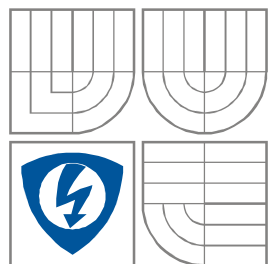


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NOSITELNÁ ANTÉNA PRO KOMUNIKACI V BLÍZKOSTI LIDSKÉHO TĚLA

WEARABLE ANTENNA OPERATING IN PROXIMITY OF HUMAN BODY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MAREK JAKUBÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR VAŠINA



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Marek Jakubíček

ID: 134507

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Nositelná anténa pro komunikaci v blízkosti lidského těla

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti výroby nositelných antén, jejich základní vlastnosti a stručně je popište. V programu CST Microwave Studio vytvořte numerický model antény pro kmitočtové pásmo ISM 2,4 GHz a dosažené výsledky porovnejte s literaturou. Ověřte vliv blízkosti lidského těla a flexibilitu antény na anténních parametrech.

Numerický model antény optimalizujte, následně anténu vyrobte, proměřte a diskutujte dosažené výsledky a vliv přesnosti výroby na její vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HALL, P.S., YANG, H. Body-centric wireless communications, 2/E. Norwood: Artech House, 2012.

[2] WANG, X., YAO, L., XU, F., ZHOU, D., QIU, Y. Design and Characterization of Conformal Microstrip Antennas Integrated into 3D Orthogonal Woven Fabrics. Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2012, Vol.52, p. 76–80.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 21.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Petr Vašina

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá možnostmi výroby nositelných antén a stručným popisem jejich základních vlastností. Pomocí programu CST Microwave Studio® je vytvořen numerický model antény pro kmitočtové pásmo ISM 2,4 GHz. Dále se zabývá vyšetřením vlivu blízkosti lidského těla pomocí dvou numerických modelů lidské tkáně. V práci je vyhodnocen vliv flexibility antény na anténní parametry. Dle získaných informací bylo vytvořeno několik vzorků antén a změřeny jejich vlastnosti. Dosažené výsledky jsou porovnány s numerickým modelem a literaturou.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nositelná anténa, elektrotextil, vliv blízkosti lidského těla, flexibilní antény

ABSTRACT

This thesis describes the possibilities of wearable antennas and the basic properties description. Numeric model for ISM 2,4 GHz band is created by CST Microwave Studio®. The thesis also deals with the human body proximity effect by two models of human tissue. The effect of flexibility to antenna parameters is evaluated. Several samples of the antenna has been created and measured. Obtained results has been compared with numeric model and with the literature.

KEYWORDS

Wearable antenna, electro-textile, human body proximity effect, flexible antennas

JAKUBÍČEK, M. *Nositelná anténa pro komunikaci v blízkosti lidského těla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 54 s., 7 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Vašina.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Nositelná anténa pro komunikaci v blízkosti lidského těla jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Vašinovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování mé diplomové práce.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	viii
SEZNAM TABULEK	x
ÚVOD	1
1 CHARAKTERIZACE NOSITELNÝCH ANTÉN	2
1.1 Základní požadavky	2
1.2 Materiály	3
1.2.1 Vodivé materiály.....	3
1.2.2 Nevodivé materiály.....	5
1.3 Návrh motivu antény	6
1.4 Měření relativní permitivity.....	8
2 TECHNOLOGIE VÝROBY	12
2.1 Tkaní	12
2.2 Vyšívání	14
2.3 Pletení	15
2.4 Sítotisk	16
2.5 Inkoustový tisk.....	17
2.6 Plátování	18
3 NUMERICKÝ MODEL	19
3.1 Anténní motiv na substrátu	19
3.2 Vliv blízkosti lidské tkáně	23
3.3 Ohyb struktury	26
3.3.1 Konkávní ohyb.....	27
3.3.2 Konvexní ohyb.....	31
3.3.3 Ohyb po povrchu koule.....	33
3.4 Srovnání výsledků s literaturou	34
4 REALIZACE	36
4.1 Plátování	36
4.1.1 Určení relativní permitivity substrátu	36

4.1.2	Vliv lidské tkáně a fantomu	38
4.1.3	Flexibilita	40
4.1.4	Vnější vlivy	45
4.2	Sítotisk	47
4.3	Použití grafitové barvy.....	47
5	ZÁVĚR	49
	LITERATURA	50
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	52
A	Technická dokumentace	55
B	Seznam materiálů a přístrojů	56
B.1	Seznam použitých materiálů	56
B.2	Seznam použitých přístrojů a pomůcek	56
C	Výpočet rozměrů motivu flíčku v programu MatLab	57
D	vlastnosti použitých textilních materiálů	58
E	Fotografie	59
E.1	Korpus pro měření ohybu antény.....	59
E.2	Měření na fantomu a v bezodrazové komoře.....	59
E.3	Plátování	60
E.4	Sítotisk	61
E.5	Měření vlivu přítomnosti vody	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Kategorie vodivých vláken.....	4
Obrázek 1.2 Princip metody dutého vlnovodu	4
Obrázek 1.3 Náčrt flíčkové antény.....	8
Obrázek 1.4 Princip metody reverzního postupu.....	11
Obrázek 2.1 Struktura tkané textilie	13
Obrázek 2.2 Struktura tkaných látek.....	13
Obrázek 2.3 Vyšetření parametrů vyšívaného vzoru.....	14
Obrázek 2.4 Schéma zátažné vazby.....	15
Obrázek 2.5 Princip sítotisku.....	17
Obrázek 2.6 Princip leptání fólie	18
Obrázek 3.1 Činitel odrazu základní struktury antény	20
Obrázek 3.2 Směrový diagram základní struktury na 2,45 GHz	21
Obrázek 3.3 Model lidské tkáně	24
Obrázek 3.4 Činitel odrazu při použití dvou modelů lidské tkáně.....	26
Obrázek 3.5 Směrové charakteristiky pro dva modely lidské tkáně na 2,45 GHz	26
Obrázek 3.6 Obecný model ohybu struktury	27
Obrázek 3.7 Obecný model ohybu podél osy y (vlevo) a x (vpravo).....	27
Obrázek 3.8 Činitel odrazu dvou způsobů napájení při R90 osy y.....	29
Obrázek 3.9 Činitel odrazu pro dva poloměry ohnutí kolem osy y.....	30
Obrázek 3.10 S_{11} dvou poloměrů ohybu kolem osy x	31
Obrázek 3.11 Obecný model konvexního ohybu.....	31
Obrázek 3.12 Činitel odrazu pro rozdílné orientace konvexního ohybu pro R40	32
Obrázek 3.13 Obecný model struktury ohybu po povrchu koule R50	33
Obrázek 3.14 Činitel odrazu při ohybu struktury po povrchu koule R 50.....	34
Obrázek 4.1 Flíčková anténa realizovaná pomocí měděné fólie	36
Obrázek 4.2 Činitel odrazu při určení relativní permitivity fleecu.....	37
Obrázek 4.3 Činitel odrazu realizovaných vzorků.....	37
Obrázek 4.4 Činitel odrazu při vyšetření vlivu lidské tkáně, vzorek A.....	38
Obrázek 4.5 Směrové charakteristiky pro anténu ve volném prostoru, vzorek A	39
Obrázek 4.6 Směrové charakteristiky pro anténu umístěnou na fantom, vzorek A	40

Obrázek 4.7 Činitel odrazu při umístění tkáně na horní stranu antény, vzorek A.....	40
Obrázek 4.8 Činitel odrazu pro konkávní ohyb dle osy y, vzorek A.....	41
Obrázek 4.9 Činitel odrazu pro konkávní ohyb dle osy x, vzorek A.....	41
Obrázek 4.10 Činitel odrazu pro konkávní ohyb dle osy y na tkáni, vzorek A.....	42
Obrázek 4.11 Činitel odrazu pro konkávní ohyb dle osy x na tkáni, vzorek A.....	43
Obrázek 4.12 Činitel odrazu pro konvexní ohyb dle osy y, vzorek A.....	43
Obrázek 4.13 Činitel odrazu pro konvexní ohyb dle osy x, vzorek A.....	44
Obrázek 4.14 Činitel odrazu pro ohyb po povrchu koule na tkáni, vzorek A	44
Obrázek 4.15 Činitel odrazu vzorku A před a po vyšetření flexibility	45
Obrázek 4.16 Vliv nepromokavé vrstvy a množství vody na jejím povrchu, vzorek A.	46
Obrázek 4.17 Činitel odrazu při stlačení struktury na 50% výšky, vzorek A.....	46
Obrázek 4.18 Motiv vytvořený sítotiskovou metodou – nevodivá barva.....	47
Obrázek 4.19 Motiv realizovaný pomocí grafitového spreje	48
Obrázek 4.20 Činitel odrazu grafitového vzorku antény	48

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 Parametry vodivé barvy [6]	5
Tabulka 1.2 Vypočtené rozměry výchozího modelu	8
Tabulka 2.1 Parametry vyšívaného vzoru s různým rozlišením [14]	15
Tabulka 3.1 Rozměry modelované flíčkové antény	19
Tabulka 3.2 Výsledky simulace základní struktury	20
Tabulka 3.3 Parametry směrových diagramů základní struktury	21
Tabulka 3.4 Rozměry optimalizované struktury	22
Tabulka 3.5 Výsledky simulace struktury s vyšším substrátem	22
Tabulka 3.6 Parametry směrových diagramů struktury s vyšším substrátem	22
Tabulka 3.7 Parametry použitých modelů lidské tkáně	23
Tabulka 3.8 Výsledky simulací pro dva modely lidské tkáně	24
Tabulka 3.9 Parametry směrových charakteristik pro dva modely lidské tkáně	25
Tabulka 3.10 Výsledky porovnání dvou způsobů napájení při R90 osy y	28
Tabulka 3.11 Parametry směrových charakteristik dvou způsobů napájení při R90 osy y	28
Tabulka 3.12 Výsledky simulací dvou poloměrů ohybu kolem osy y	29
Tabulka 3.13 Výsledky simulací dvou poloměrů ohybu kolem osy x	29
Tabulka 3.14 Parametry směrových charakteristik dvou poloměrů ohybu y a x	30
Tabulka 3.15 Výsledky simulace pro dvě orientace konvexního ohybu při R40	32
Tabulka 3.16 Parametry směrových charakteristik konvexního ohybu ve dvou směrech při R40	32
Tabulka 3.17 Výsledky simulace pro ohyb po povrchu koule R50	33
Tabulka 3.18 Parametry směrových charakteristik pro ohyb po povrchu koule R50	33
Tabulka 4.1 Parametry směrových charakteristik antény ve volném prostoru a na fantomu	39

ÚVOD

V posledním desetiletí je vyvíjen tlak na vývoj nositelných antén, určených pro aplikace umístěné na oděvu, nebo přímo na lidském těle. Tyto antény naleznou své uplatnění v medicíně, průmyslu, armádě, kosmonautice nebo pro aplikace tzv. chytrého oděvu, ať už pro účely monitorování zdravotního stavu uživatele, zajištění komunikace, docházkového systému nebo pro nevyčerpatelné možnosti multimediální zábavy.

Cílem práce je seznámit se s dostupnými technologiemi výroby textilií vhodnými pro návrh nositelných antén. Následným krokem je návrh matematického modelu nositelné antény a sledování vlivu přítomnosti lidského těla a deformace struktury na parametrech modelu antény. Získaná data budou porovnána s realizovanou anténou navrženou pro frekvenční pásmo ISM 2,4 – 2,5 GHz.

První kapitola představuje základní požadavky nositelných antén a seznamuje čtenáře s několika základními materiály vhodnými pro výrobu antén. Dále uvádí postup výpočtu motivu flíčkové antény a metody měření relativní permitivity. Druhá kapitola představuje několik výrobních procesů pro implementaci antén na textil a srovnává jejich vlastnosti. Ve třetí kapitole jsou uvedeny simulace numerického modelu pomocí programu CST Microwave Studio® na modelu lidské tkáně a při několika různých scénářích mechanického ohybu. V poslední kapitole je uveden postup realizace několika vzorků antén a následně jsou změřeny jejich parametry a porovnány se získanými daty.

1 CHARAKTERIZACE NOSITELNÝCH ANTÉN

Uživatel nositelné antény bude s anténou v každodenním kontaktu, a proto by při návrhu měl být kladen důraz nejen na velikost struktury, ale i na další fyzické parametry tak, aby jí uživatel nebyl obtěžován při každodenních činnostech. Přitom však musí být stále zachovány veškeré elektrické vlastnosti.

1.1 Základní požadavky

Z hlediska aplikačního využití a kapacity kanálu jsou obecně prvními výchozími parametry, pro návrh antény, pracovní frekvence a šířka pásma, od čehož se odvíjí především velikost a tvar anténního motivu. Nositelná anténa nesmí být příliš úzkopásmová, jelikož při deformaci motivu vlivem běžného užívání může docházet k výraznému rozladění rezonanční frekvence a k deformaci vyzařovací charakteristiky. U antén určených pro použití na lidském těle je ideální 180° vyzařovací diagram ve směru kolmém od roviny těla z důvodu, že nelze jednoznačně určit polohu druhého komunikačního bodu umístěného mimo tělo. Tato konfigurace se někdy označuje jako *Off Body Communication*. Takováto anténa by však měla na úkor velkého vyzařovacího úhlu velmi malý zisk. Je tedy vhodné zvolit vhodný kompromis mezi vyzařovací charakteristikou a ziskem. V případě, kdy jsou komunikující body umístěny na těle (*On Body Communication*), jsou požadavky na směrové charakteristiky odlišné, dle konkrétní konfigurace bodů. Vzhledem k povaze lidského těla je potřeba vzít v úvahu i vliv lidské tkáně a možnost mechanického ohybu struktury.

Volba materiálu a technologie výroby umožňující ohyb elektricky vodivého motivu a substrátu, je jedním z důležitých kroků při návrhu nositelné antény. Tato vlastnost je nutná jednak kvůli dlouhodobým deformacím na některých částech lidského těla (např. rameno, paže, koleno...), ale také kvůli krátkodobým deformacím způsobeným pohybem uživatele či aktuálními postavením těla. Ohybem struktury však nesmí dojít k výraznému zhoršení elektrických vlastností, především deformaci vyzařovací charakteristiky, posunu rezonanční frekvence a zhoršení impedančního přizpůsobení. Na materiál jsou kladeny požadavky, jako je nízká hmotnost, poddajnost, odolnost při deformaci a minimální roztažitelnost. Ke komfortu uživatele přispívá také nízký profil antény. Výše zmíněné parametry by se ideálně neměly měnit ani při stlačení antény (zejména u antén s pěnovými substráty) a při změnách teploty a vlhkosti vzduchu. Některé vlastnosti zajišťující stabilní elektrické parametry antény jsou nevhodné pro zajištění komfortu uživatele, a naopak.

V neposlední řadě je volba polarizace antény. Vzhledem k tomu, že anténa na těle bude vždy s jistou neurčitostí natočena oproti pevné anténě mimo tělo, není vhodné použití lineární polarizace na obou stranách rádiového spoje. Antény jsou koncipovány k použití v blízkosti lidského těla, a je tedy nutné vyšetřit vliv kůže, tuku, svaloviny a případně i kosti na parametry antény. Dalšími důležitými parametry jsou impedanční přizpůsobení antény, zisk a velikost vyzařovacího úhlu.

1.2 Materiály

Kapitola se zabývá několika typy materiálů vhodných k výrobě nositelných antén, jejich vlastnostmi a možnostmi použití. První skupinou jsou vodivé materiály zajišťující vyzařování elektromagnetické vlny, napájení motivu, impedanční přizpůsobení a případně i funkci zemní desky. Druhou skupinou jsou běžné textilie, fólie či plasty zastávající funkci dielektrické vrstvy a zároveň nosiče antény. Parametry obou typů těchto materiálů zásadně ovlivňují elektrické vlastnosti nositelných antén.

1.2.1 Vodivé materiály

Vodivé materiály jsou definovány měrnou vodivostí σ v případě samostatných vláken, nebo povrchovou rezistivitou R_s v případě již utkaných textilií. Elektrická vodivost na textiliích může být obecně zajištěna:

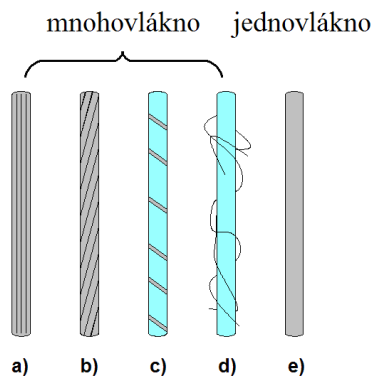
- elektrotextilem
- elektricky vodivou barvou
- fólií

Elektrotextil je vodivá tkanina vytvořena pomocí zdokonalených kovovopolymerových vláken kombinací s běžnými látkami nebo pomocí samostatných vodivých vláken. Tyto látky jsou považovány za vhodného kandidáta k integraci na oděv pro účely elektronických aplikací určených k použití na tělo, jelikož je lze prát, jsou mechanicky odolné a flexibilní [1]. Vodivé látky na oděvu byly poprvé použity jako elektromagnetické stínění v osmdesátých letech [2].

Existují tři principy vytvoření vodivého vlákna [1]:

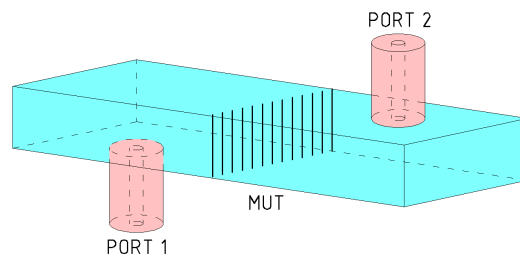
- plnění vláken uhlíkem nebo kovem
- nanesení vrstvy vodivých polymerů nebo kovů na vlákno
- použití vláken vyrobených z plně vodivých materiálů

Vodivá vlákna jsou vytvořena z jedné nebo více vodivých a nevodivých vláken. Na obr. 1.1 jsou znázorněny dvě kategorie vodivých vláken. Obr. 1.1(a)-(d) znázorňuje vícevláknové řešení a jednovláknové řešení znázorňuje obr. 1.1(e). Každé z nich má rozdílné elektrické vlastnosti, vhodnost k použití na oděvu a spolehlivost. Jednovláknová varianta znázorněná na obr. 1.1(e) je vytvořena z mědi a potažená tenkou vrstvou stříbra (průměr vlákna 40 μm). Vlákno X-static® na obr. 1.1(a) je vytvořeno z více tenkých elastických nylonových vláken s vrstvou stříbra. Na obr. 1.1(c)-(d) jsou vlákna složená z izolačních a kovových materiálů. Oba typy jsou vyrobeny předemím měděných vláken s vrstvou stříbra na povrchu s průměrem 40 μm , které jsou ovinuty kolem nevodivého jádra, vytvořeného z množství samostatných nevodivých vláken. Silná nevodivá vlákna tak mohou ochránit ta tenčí a méně pevná před vnějšími vlivy, což zaručí jejich vyšší mechanickou odolnost při zachování jejich elektrických vlastností. Pokud je nevodivé jádro vytvořeno způsobem uvedeným v případě z obr. 1.1(d), stává se vodivé vlákno rozpínavějším, což je jeden z požadavků pro použití na oděvu, a látka tak zároveň připomíná tradiční materiály pro oděv [3].



Obrázek 1.1 Kategorie vodivých vláken

Vytvořením obdélníkové rezonanční dutiny s vodivými kovovými stěnami, do které je vložen testovaný vodivý materiál, může být z činitele jakosti Q nezatížené kovové dutiny stanovena povrchová rezistivita testovaného materiálu. Pomocí paralelního uspořádání vodivých vláken v apertuře vlnovodu, jak je znázorněno na obr. 1.2, je možno vyhodnotit povrchovou rezistivitu různých kategorií vodivých vláken na vyšších frekvencích před vytvořením látky z testovaného vodivého vlákna, což dovolu je porovnání elektrických vlastností vlákna nezávisle na vzoru textilie. Detailní postup měření a vztahy k výpočtu efektivní povrchové rezistivity jsou uvedeny v [4].



Obrázek 1.2 Princip metody dutého vlnovodu

Danou metodou byly v [3] porovnány vlastnosti čtyř rozdílných vodivých vláken, pro hustotu vláken 36 ppi (picks per inch) na frekvenci 11,4 GHz. Nejlepších parametrů dosahovalo postříbřené vlákno o průměru 159 μm . Vliv hustoty vláken vzoru textilie je oproti volbě vodivého materiálu méně výrazný.

Mezi výhody elektrotextilu patří především komfort použití, malá hmotnost a nízký profil, velmi dobrá flexibilita a poddajnost. Nevýhodami jsou složitý a nákladný proces výroby, horší přesnost výroby a nemožnost realizace složitějších motivů.

Další možností je použití elektricky vodivé barvy při sítotisku, nebo inkoustovém tisku. Tato barva musí kromě vhodné elektrické vodivosti vykazovat i vhodnou viskozitu pro pohodlné nanesení na substrát a zamezení prosáknutí textilem. Pro správnou funkci antény musí být zajištěna flexibilita a nelámavost vrstvy po jejím ztuhnutí. Pro inkoustový tisk pomocí materiálových tiskáren je velmi důležitá ideální

viskozita a povrchové napětí inkoustu. Pro tyto účely je často využívána barva *Silver Ink U5714* firmy *Sun Chemicals* ®. Při sítotiskové metodě je často využíván *Electrodag PF 410* firmy *Henkel* ®. Dále je možnost použití barev ve spreji, např. *Graphit 33* od firmy *Kontakt Chemie* ®. Ta má však pro tyto účely velmi vysokou povrchovou rezistivitu 1000 – 2000 $\Omega/\text{čtverec}$ [5]. Barva ve sprejích se vyznačuje malou viskozitou. Nejsou tak příliš vhodné pro použití na tenkých textiliích, z důvodu možného prosáknutí barvy substrátem.

Parametry barvy *Electrodag PF 410* uvedené v technické dokumentaci [6] jsou uvedeny v tab. 1.1.

Tabulka 1.1 Parametry vodivé barvy [6]

podíl pevných látek	%	75
viskozita	Pa·s	17,5
hustota	kg·m ³	2500
povrchová rezistivita	$\Omega/\text{čtverec}$	< 0,025

Viskozita určuje, do jaké míry barva pronikne tkaninou, na niž bude nanesena. U těchto barev je nevýhodou, že může docházet k jejich popraskání či otěru, což vede k zásadnímu ovlivnění elektrických vlastností. Dalším mínusem je jistá neurčitost hloubky vniku barvy do textilie, což opět závisí na viskozitě. Některé typy barev mohou textil i nalepovat.

Elektricky vodivé fólie se nejčastěji používají pro drobné opravy vodivých cest plošných spojů. Tyto fólie jsou často vytvořeny pouze z vodivých materiálů bez dalších příměsí. Nevýhodou je nízká odolnost vůči namáhání materiálu v ohybu a stříhu. Výhodami jsou dobré elektrické vlastnosti. Např. měděná samolepicí fólie od firmy *ELCHEMCo* s výškou 0,04 mm dosahuje povrchové rezistivity 0,1 – 10 $\Omega/\text{čtverec}$ [7]. Připevnění fólie na substrát se provádí pomocí speciálních elektricky vodivých lepidel, nebo nažehlováním.

1.2.2 Nevodivé materiály

U materiálu pro dielektrikum musí být zajištěna stálost elektrických vlastností při mechanické deformaci, změně teploty či vlhkosti okolí. Obecně je tedy textil nevhodným materiálem pro dielektrikum. Nehomogenní a často i neizotropní vlastnosti nemusí zajistit spolehlivost. Proměnná výška a nasákavost nezajistí stabilitu elektrických vlastností antény. Vyšetřením vlastností textilií však lze některým jevům předcházet a textilie pro tyto účely použít.

Často používaným materiálem je především bavlna. Ta se v kombinaci např. se syntetickým polyesterem stává mechanicky odolnější. Hodnota relativní permitivity ϵ_r textilií se pohybuje v rozmezí 1 - 2. Při použití pěnových substrátů může hodnota relativní permitivity ϵ_r dosahovat až 4 v závislosti na použitém materiálu. Pěnové substráty mohou být vyrobeny např. z polyethylenu v kombinaci s dalšími příměsemi. Je poměrně obtížné zajistit stabilní elektrické vlastnosti textilu. Změnám relativní permitivity ϵ_r vlivem vlhkosti lze částečně zabránit pomocí impregnačních látek nebo ochranných vrstev. Je však nutné vyšetřit jejich vliv na celou strukturu.

Ve struktuře textilních látek jsou mezi vlákny vzduchové mezery, které také mají vliv na relativní permitivitu celého substrátu.

V [8] bylo dielektrikum vytvořeno použitím papíru odolného vůči vodě. Papír je velmi levná alternativa a s nízkým profilem a flexibilitou je možným kandidátem pro aplikace nositelných antén. Další výhodou oproti textilu je jeho pevnost vůči pnutí. Má však tendenci zůstávat ve zdeformovaném stavu a vzhledem k takřka nulové roztažnosti neumožňuje ohyb ve více směrech současně. Substrátem mohou být také speciální fólie nebo materiály na bázi Polyethylentereftalátu (PET), které jsou však s tloušťkou přes 2 mm už velmi nepoddajné, a to zejména při současné deformaci v obou osách.

1.3 Návrh motivu antény

Pro vyšetření vlastností nositelných antén byla zvolena flíčková anténa z následujících důvodů: Prvním důvodem je vhodná velikost motivu. Pro pásmo ISM 2,4 GHz bude mít celá struktura antény rozměry maximálně 100 x 100 mm, což je stále použitelná velikost pro umístění na lidské tělo. Na anténě nejsou části s velmi malými rozměry, které by podléhaly zkáze vlivem vnějších vlivů působících při každodenních činnostech uživatele. Přesto však má flíčková anténa i se substrátem dostatečně nízký profil. Vliv změny parametrů při deformaci je vyšetřen v kapitole 3, zabývající se simulacemi na numerickém modelu. Flíčková anténa má poměrně široký vyzařovací svazek, který je pro dané použití vhodný. Flíčková anténa má mimo jiné i tu výhodu, že směr šíření elektromagnetické vlny je kolmý na anténní motiv, a tedy i na lidské tělo, kterým není vyzařovací svazek výrazně ovlivňován.

Pomocí vztahů uvedených v [9], jsou vyčísleny rozměry pro motiv flíčkové antény pro pracovní frekvenci 2,45 GHz. Simulace jsou prováděny pro dva různé materiály substrátu. Prvním je tkanina, která obsahuje bavlnu a polyester v poměru 65:35 % s relativní permitivitou $\epsilon_r = 1,48$, dále jen bavlna/polyester (CO/PES). Druhým materiálem je tkanina ze 100 % polyesteru v provedení označovaném jako fleece s $\epsilon_r = 1,07$. Aby se zabránilo problémům s barvou při realizaci sítotiskovou metodou a dosáhlo se dostatečné šířky pásma, jsou oba materiály modelovány s výškou $h_{SUB} = 3$ mm. Vztahem

$$w_{PATCH} = \frac{c_0}{2 \cdot f_{REZ}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}, \quad (1)$$

kde c_0 je rychlost světla ve vakuu, f_{REZ} je požadovaná rezonanční frekvence antény a ϵ_r je relativní permitivita substrátu, vyčíslíme hodnotu pro šířku motivu antény w_{PATCH} . Jelikož anténa není umístěna v prostředí se stejnými parametry, jako je substrát, je nutné vzít v úvahu změnu chování vlny na rozhraní těchto dvou prostředí. K tomuto účelu je nutné číselně vyjádřit efektivní permitivitu ϵ_{reff} pomocí vztahu

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h_{SUB}}{w_{PATCH}} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

kde ϵ_r je relativní permitivita substrátu, h_{SUB} je výška substrátu a w_{PATCH} je šířka motivu. K určení délky antény je nejdříve nutné určit její zkrácení Δl pomocí (3)

$$\Delta l = h_{SUB} \cdot 0,412 \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \cdot \left(\frac{w_{PATCH}}{h_{SUB}} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{w_{PATCH}}{h_{SUB}} + 0,8 \right)}, \quad (3)$$

kde h_{SUB} je výška substrátu, ϵ_{reff} je efektivní permitivita a w_{PATCH} je šířka motivu. Nyní lze pomocí (4) vyčíslit konečnou délku motivu jako

$$l = \frac{c_0}{2 \cdot f_{REZ} \cdot \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2 \cdot \Delta l, \quad (4)$$

kde c_0 je rychlost světla ve vakuu, f_{REZ} je požadovaná rezonanční frekvence antény, Δl je zkrácení délky motivu a ϵ_{reff} je efektivní permitivita. K účelům impedančního přizpůsobení vedení k mikropáskovému napájení je potřeba vyčíslit několik veličin. V první fázi je vypočtena vodivost antény pomocí (5)

$$G = \frac{w_{PATCH}}{120 \cdot \lambda_0} \cdot \left[1 - \frac{1}{24} \cdot (k_0 \cdot h_{SUB})^2 \right], \quad (5)$$

kde w_{PATCH} je šířka motivu, λ_0 je vlnová délka ve volném prostoru, k_0 je vlnové číslo a h_{SUB} je výška substrátu, přičemž

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}, \quad (6)$$

kde c_0 je rychlost světla ve vakuu a f je pracovní kmitočet a vlnové číslo

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \quad (7)$$

kde λ_0 je vlnová délka. Dosazením získáme vstupní hranovou impedanci jako

$$R_{EDGE} = \frac{1}{2 \cdot G}, \quad (8)$$

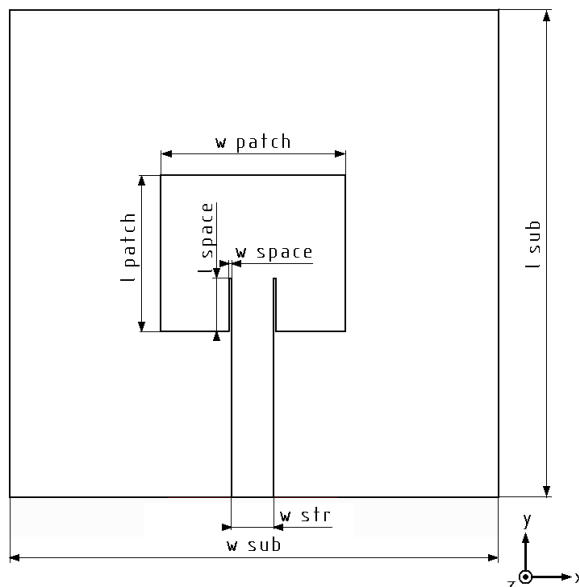
kde G je vodivost antény. Pro správnou činnost antény je nutná transformace hranové impedance na požadovanou charakteristickou impedanci vedení. Toho lze dosáhnout pomocí přizpůsobovací mezery ve flíčku o délce l_{SPACE} a šířce w_{SPACE}

$$l_{SPACE} = \frac{l_{PATCH}}{\pi} \arccos\left(\sqrt{\frac{R_{50}}{R_{EDGE}}}\right), \quad (9)$$

kde R_{50} je požadovaná impedance 50Ω a R_{EDGE} je hranová impedance antény. Po dosazení do vztahů (1) – (9) dostáváme rozměry pro výchozí model antény (tab. 1.2). Popis parametrů je znázorněn na obr. 1.3.

Tabulka 1.2 Vypočtené rozměry výchozího modelu

		CO/PES	fleece
ϵ_r	[-]	1,48	1,07
f_{REZ}	[GHz]	2,45	2,45
h_{SUB}	[mm]	3	3
w_{PATCH}	[mm]	54,98	60,18
l_{PATCH}	[mm]	47,71	55,13
l_{SPACE}	[mm]	13,87	15,44



Obrázek 1.3 Náskres flíčkové antény

1.4 Měření relativní permitivity

Tato kapitola stručně popisuje několik základních metod stanovení relativní permitivity materiálu a vyhodnocuje možnost použití pro účely textilních materiálů.

Pro vytvoření numerického modelu antény a následnou realizaci je nutná znalost

hodnoty relativní permitivity, jelikož má výrazný vliv na posun rezonanční frekvence struktury. Konkrétně u vyšetřované struktury v pásmu ISM 2,4 GHz znamená změna relativní permitivity o 0,1 posun rezonanční frekvence přibližně o 100 MHz. Textil je obecně nehomogenním a často i neizotropním materiálem. Dále se jejich parametry liší dle výrobce, technologií výroby a použitými materiály. Nelze se tedy spoléhat na hodnoty udávané v odborných publikacích a je nutné zjistit hodnotu relativní permitivity vždy konkrétní textilie.

Základní metody měření relativní permitivity dielektrika [10]:

- metoda paralelních desek
- metoda přenosového vedení
- sonda s otevřeným koncem
- měření ve volném prostoru
- dutinový rezonátor
- flíčková anténa pokrytá měřeným materiálem

Metodou paralelních desek je testovaný materiál (MUT) vložen mezi dvě paralelní desky, čímž vznikne kondenzátor. Měřením pomocí RLC metru získáme kapacitu C , která je popsána vztahem [10]:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}, \quad (10)$$

kde C je kapacita struktury, ϵ_0 je permitivita vakua, ϵ_r je relativní permitivita testovaného materiálu, S je plocha desek a d je vzdálenost mezi deskami. Ze vztahu (10) získáme [10]:

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot S}. \quad (11)$$

Nevýhodou této metody je omezené frekvenční pásmo použití do 1 GHz [10]

Metoda přenosového vedení spočívá v umístění testovaného materiálu do dutého vlnovodu nebo koaxiálního vedení a sledování přenosových parametrů struktury pomocí VNA. Měřením pomocí vlnovodu je omezujícím faktorem jeho kritický kmitočet. Vztahy pro získání relativní permitivity jsou popsány v [10]. Nevýhodou je obtížné umístění měřeného materiálu do vedení, aniž by došlo k deformaci materiálu, nebo vzniku vzduchových mezer ve vedení. Další variantou je způsob, kdy měřený materiál zaplňuje jen část objemu ústí vlnovodu [11].

Pomocí sondy s otevřeným koncem je relativní permitivita stanovena z činitele odrazu na vstupu. Opět je tedy použit VNA. Problémem je obtížnější proces kalibrace sondy, který zahrnuje stanovení referenčních hodnot např. metanolu nebo destilované vody. [10] Dalším problémem je nedokonalý kontakt mezi sondou a měřeným materiálem. [11] To může být u pevných látek eliminováno přitlačením sondy na měřený materiál, ale v případě textilních materiálů tak dochází k jejich deformaci.

Výbava potřebná pro měření ve volném prostoru zahrnuje kromě VNA i dvě identické referenční antény. Dle [10] je výhodou této metody možnost sledování změn parametrů prostředí jako je vlhkost a teplota, a také skutečnost, že při této metodě nedochází ke kontaktu s měřeným materiálem. Vzhledem k tomu, že tedy nedochází k deformaci měřeného materiálu, je tato metoda velmi vhodná pro textilní materiály.

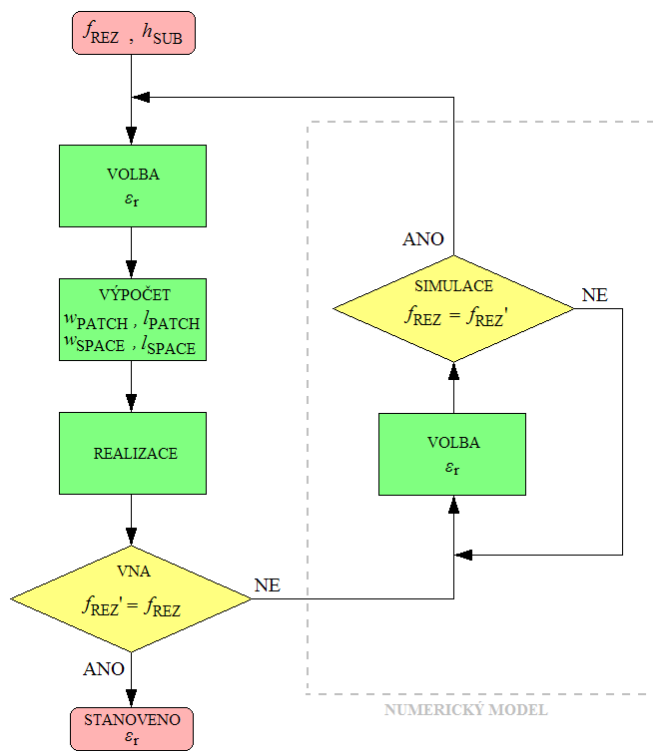
Metoda dutinového rezonátoru sestává z VNA a vlnovodu nebo koaxiálního vedení se štěrbinou. V [12] je vzorek testovaného materiálu pomocí držáku vložen do dutiny. Detailní postup stanovení relativní permitivity je popsán v [12]. Tato metoda je vzhledem k šířce štěrby vhodná pro velmi tenké materiály. Při větších rozměrech štěrby mohou být výsledky zkresleny.

Stanovení permitivity pomocí pokrytí referenční antény měřeným materiálem spočívá ve sledování posunu rezonanční frekvence. Postup je uveden v [13]

Dalším možným způsobem je stanovení permitivity metodou reverzního určení z již vyrobené antény. Tento postup lze velmi dobře uplatnit především s pomocí úzkopásmových antén, kde je relativní permitivita dielektrika jediným neznámým parametrem struktury. U materiálů, kde neočekáváme velkou hodnotu $\tan \delta$, lze zanedbat i tuto neznámou. Nevýhodou je nutnost výroby minimálně jednoho referenčního vzorku. Výhodou je jednoduchost metody a nenáročnost na přístrojové vybavení. Postup pro flíčkovou anténu je následující:

1. Za neznámou ϵ_r je dosazena odhadovaná hodnota materiálu.
2. Ze vstupních hodnot f_{REZ} , h_{SUB} a ϵ_r jsou po dosazení do vztahů (1) – (9) získány rozměry referenční antény w_{PATCH} , l_{PATCH} , w_{SPACE} , l_{SPACE} . Pro minimalizaci zatížení výsledku chybou je vhodné použít spolehlivý elektricky vodivý materiál, např. stříbrnou nebo měděnou fólii. Následně je pomocí počítačového softwaru provedena simulace navrženého modelu s dosazenou hodnotou ϵ_r .
3. Změřením činitel odrazu na vstupu realizované antény pomocí VNA je získána skutečná rezonanční frekvence antény f_{REZ}' . Pokud $f_{\text{REZ}}' > f_{\text{REZ}}$, pak skutečná hodnota $\epsilon_r' < \epsilon_r$ a naopak.
4. Simulací numerického modelu je hledána taková nová hodnota ϵ_r , pro kterou platí $f_{\text{REZ}} = f_{\text{REZ}}'$. Za ideálních podmínek tato hodnota ϵ_r odpovídá skutečné relativní permitivitě měřeného materiálu. S touto hodnotou je provedena první iterace dosazení do vztahů (1) – (9) a jsou získány nové rozměry antény w_{PATCH} , l_{PATCH} , w_{SPACE} , l_{SPACE} .
5. Rezananční frekvence první iterace realizace antény je následně ověřena pomocí VNA. Pokud $f_{\text{REZ}} \neq f_{\text{REZ}}'$, je nutné provést druhou iteraci postupu od bodu 3.

Zjednodušený princip postupu je znázorněn na obr. 1.4.



Obrázek 1.4 Princip metody reverzního postupu

2 TECHNOLOGIE VÝROBY

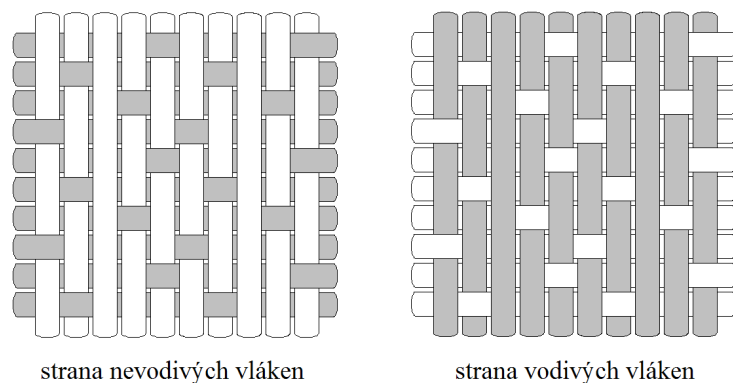
Tato kapitola popisuje několik základních způsobů výroby nositelných antén, především tedy technologie implementace elektricky vodivé vrstvy na textilií.

2.1 Tkaní

Technologie tkaní je proces výroby textilních látek. V principu se jedná o opakované křížení podélných (angl. warp) a příčných (angl. weft) soustav vláken. V nejjednodušším provedení, kdy se příčná a podélná vlákna kříží v poměru 1:1, je soustava podélných vláken uchycena a napnuta. V první fázi cyklu jsou zdvižena lichá podélná vlákna, čímž vznikne prostor, kterým je provlečeno příčné vlákno. V dalším kroku jsou zdvižena sudá podélná vlákna a příčné vlákno je vzniklým prostorem provlečeno zpět. Tím vzniká tkaný vzor, kde příčné vlákno vždy prochází celou šířkou látky. Při jiném poměru tkaného vzoru je vždy pozvednuta větší skupina nití. Pro účely planárních obvodů je tato technologie vhodná především pro tvorbu větších ploch. Tato technologie tedy není příliš vhodná pro výrobu velmi malých prvků motivu.

Vzhledem k rozdílným technologickým postupům výroby, které nebyly primárně určeny k vytváření planárních mikrovlnných obvodů, mohou mít nesymetrické části materiálu vliv na elektrické parametry. Utkaný elektrotextil může být vytvořen buď pouze z vodivých vláken, nebo z vodivých vláken v jednom směru a nevodivých vláken ve směru druhém. Jak je znázorněno na obr. 2.1, tkaný vzor je vytvořen vždy v určitém poměru horizontálních a vertikálních vláken. Stranu, ze které je patrný větší počet textilních nití, označujeme jako stranu nevodivých vláken. Druhá strana textilie je pak označována jako strana vodivých vláken.

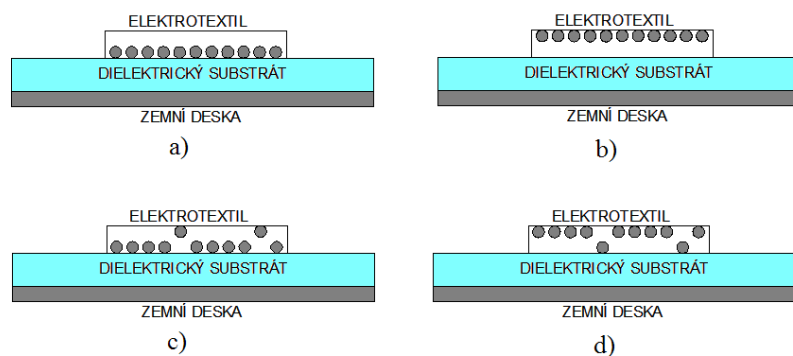
Jak je uvedeno v [3], tento poměr může být součástí označení textilie. Pokud je například překřížení příčných a podélných vláken v poměru 4:1 a vzor se opakuje každých pět vláken, tkaný vzor je označen např. jako Satin 5. Dále je tkaný vzor definován hustotou vláken na jednotku plochy.



Obrázek 2.1 Struktura tkané textilie

V případě z obr. 2.2 je znázorněno několik struktur tkaných látek z bočního pohledu. Paralelně uspořádané tmavé kruhy znázorňují průřezy vodivých vláken. Jejich uspořádání má vliv na míru ztrát v dielektriku. V případě z obr. 2.2 (a), kde jsou vodivá vlákna umístěna pod nevodivými, většina elektrické intenzity se soustřeďuje mezi vodivá vlákna a zemní desku. V tomto případě jsou tedy ztráty v nevodivých vláknech minimální. Pokud jsou vodivá vlákna umístěna nad nevodivými, vlivem velké intenzity v oblasti nevodivých vláken jsou ztráty v dielektriku výraznější (obr. 2.2(b)). Na základě těchto předpokladů lze říci, že v případě reálného tkaného vzoru z obr. 2.2 (c), kde počet vodivých vláken ležících přímo na substrátu převažuje nad počtem nevodivých vláken, je situace obdobná jako v případě z obr. 2.2 (a). Můžeme tedy předpokládat, že dielektrické ztráty budou v tomto případě nižší než při použití vzoru 2.2 (d), kde se opět uplatní dielektrické ztráty vlivem umístění nevodivých vláken [3].

Jak již bylo zmíněno, tkaním lze vytvořit velké plochy elektrotextilu, přičemž vodivá vlákna jsou vedena celou šířkou látky. To může být vhodné pro větší vodivé motivy. Naopak problém nastane při tvorbě menších motivů, kde je nutná úprava např. stříhem. Jelikož příčná a podélná vlákna drží pohromadě jen díky vzájemnému kontaktu, může při stříhu docházet k samovolnému páření na okraji textilie a změně elektrických vlastností struktury.

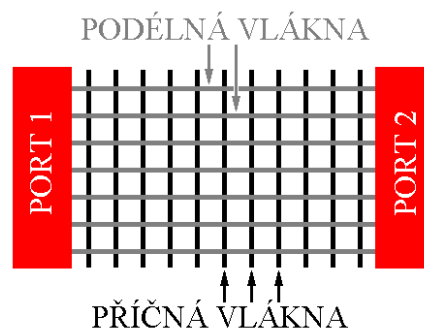


Obrázek 2.2 Struktura tkaných látek

2.2 Vyšívání

Na rozdíl od tkaní, kdy je látka vytvořena vzájemným křížením vláken bez nosné textilie, u vyšívání je tato nosná látka nutná. Dochází při ní k provlékání nitě do podkladové látky z kolmého směru.

Vyšíváním lze dosáhnout menších a flexibilnějších vodivých motivů. Vyšíváním mřížových motivů lze napodobit větší plochy anténní struktury a snížit tak náklady na výrobu antény. Výběr vhodné hustoty mřížky vyšívaného vzoru je kompromisem mezi ušetřeným materiálem a zhoršením elektrických vlastností. Zhoršení parametrů při změně hustoty vyšívaného motivu lze porovnat například sledováním hodnoty činitele přenosu S_{21} , v soustavě, kde je mezi dva porty umístěn mřížový vzor vodivých vláken s danou hustotou. Princip je znázorněn na obr. 2.3.



Obrázek 2.3 Vyšetření parametrů vyšívaného vzoru

V literatuře [14] byla touto metodou simulována deseticentimetrová část mikropáskového vedení vytvořeného čtvercovou sítí. Mezi porty byla umístěna vlákna o měrné vodivosti $\sigma = 10^4$ S/m. Při simulované hustotě mřížky 1×1 mm při frekvenci 2,5 GHz vykazoval činitel přenosu S_{21} hodnotu cca -0,7 dB, přičemž v rozmezí 2 – 3 GHz měla tato hodnota lineárně klesající tendenci v rozmezí -0,65 dB až -0,75 dB. Hodnota S_{21} na frekvenci 2,5 GHz za stejných podmínek při simulaci mřížky 5×5 mm byla -1,4 dB. Další hodnoty simulovaných mřížek jsou uvedeny v tab. 2.1. Dále bylo ověřeno, že při implementaci vyšívaných antén s danou hustotou mřížky byla rezonanční frekvence dle předpokladu vždy nižší než u plnokovového provedení [14].

V blízkosti krajních hran motivu antény je vhodné hustotu šitého vzorku zvětšit, vzhledem k vyšší proudové hustotě v těchto místech.

Tabulka 2.1 Parametry vyšívaného vzoru s různým rozlišením [14]

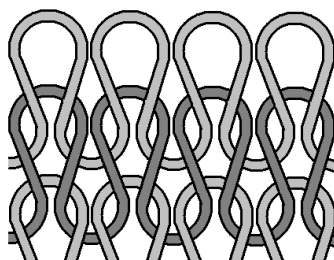
Rozlišení mřížky [mm x mm]	S_{21} při 2 GHz [dB]	S_{21} při 2,5 GHz [dB]	S_{21} při 3 GHz [dB]
plná vrstva	-0,30	-0,30	-0,30
1 x 1	-0,65	-0,70	-0,75
2 x 2	-0,95	-1,00	-1,10
3 x 3	-1,05	-1,00	-1,10
4 x 4	-1,30	-1,30	-1,40
5 x 5	-1,50	-1,40	-1,60

V závislosti na průřezu vodivého vlákna lze dosáhnout přesnosti výroby motivu až 0,5 mm v případě kvalitního automatizovaného vyšívání. Je však vhodné s touto odchylkou počítat už při výpočtech a simulaci. Výhodou vyšívaných antén je absence lepidla, a tedy větší odolnost vůči vnějším vlivům. Lze tak velmi jednoduše a rychle vytvářet větší množství antén bez nutnosti dalších technologických postupů.

2.3 Pletení

Ruční pletení je velmi stará metoda, jak jednoduše pomocí příze a dvou jehlic vytvořit plošné textilní vzory, které jsou velmi flexibilní, ačkoliv hustota vzoru je velmi nízká. Základem je ohyb vláken do kliček. Déle se vlákna navzájem kříží, čímž vzniká tzv. očko. Vytvářením většího množství řad oček pak vzniká pletenina, tedy textilie vytvořená pletením. Viz obr. 2.4. Strojní pletení je v zásadě stejný princip jako ruční pletení s použitím speciálních nástrojů místo pletacích jehlic.

U pletených motivů je nutné počítat s většími ztrátami vlivem nehomogenního povrchu, které se projeví ve větší míře než u tkaných vzorů. To je způsobeno meandrovitým ohybem vlákna.



Obrázek 2.4 Schéma zátěžné vazby

Pletením vodivého motivu antény je potřeba počítat s tím, že účinnost antény může poklesnout až o 50% oproti standardní anténě [15].

V [16] byly změřeny antény, u nichž byl pletením vytvořen substrát i zemní deska.

Vzorky byly napájeny pomocí koaxiální sondy. V této práci bylo zjištěno, že zmenšením rozlišení pleteného vzoru se sníží rezonanční frekvence obvodu.

Činitel jakosti Q pletené látky v dutinovém rezonátoru dosahuje hodnot 8 – 16 v závislosti na směru orientace pleteného vzoru vzhledem k delší straně obdélníkového rezonátoru. Tento pokles v porovnání s výsledky tkané látky může být zdůvodněn vlivem prokládané struktury pleteného vzoru. Vodivé cesty existují ve všech směrech přes vodivá vlákna spolu s kontaktními spoji přes vlákna. Nicméně vodivost těchto proudových cest není ve všech směrech uniformní. Elektrická spojení vzájemným kontaktem vodivých vláken mají větší ztráty než elektrická spojení přímo přes vodivé vlákno [3].

2.4 Sítotisk

Bezesporu nejpopulárnějším způsobem vytváření motivu na textil je sítotisk. V principu se jedná o nanášení barvy na textil přes průchodné síto o definované hustotě. Různé způsoby sítotisku se v zásadě liší pouze rozdílnou metodou vytvoření šablony, která omezuje prostor tisku motivu na textil. Postup nejrozšířenějšího způsobu sítotisku je následující:

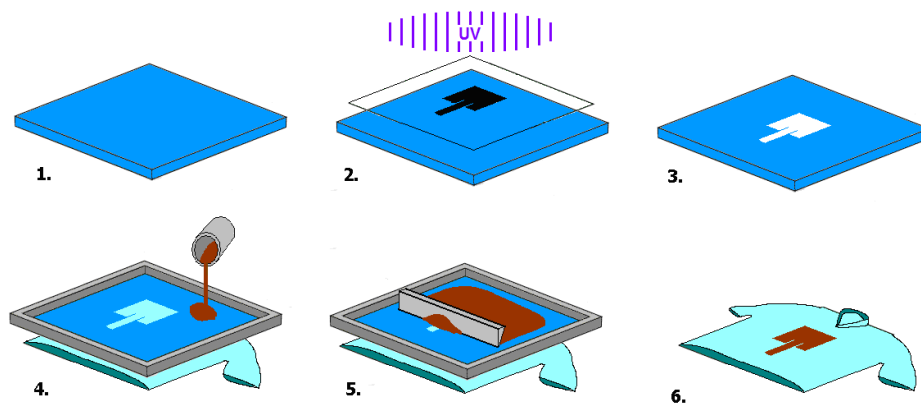
1. Po napnutí plátna na rám je v zatemněných prostorech na vnější stranu síta nanášena rovnoměrná vrstva fotocitlivé emulze. To je provedeno pomocí tzv. „korýtka“, ve které je emulze umístěna. Síto je přitom v takřka vertikální poloze a pohyb korýtkem je veden směrem nahoru.
2. Emulze je umístěna na 4 až 8 hodin do zatemněného prostoru a do 48 hodin od nanesení by mělo dojít k osvitu UV lampou nebo jiným zdrojem světla obsahující UV záření. Pozitivní motiv struktury musí být umístěn tak, aby výsledný negativ nebyl příliš blízko rámu síta. Délka doby osvitu závisí na výkonu lampy a na výšce vrstvy emulze.
3. Vlažnou tekoucí vodou je síto pozvolna oplachováno, dokud nedojde k vymytí neosvícené emulze.
4. Síto je položeno na textil a do vnitřní strany síta blíže k jedné z hran rámu je vloženo dostatečné množství barvy.
5. Pomocí stěrky o vhodné tvrdosti je barva jedním tahem rozprostřena po celé ploše plátna. Tím dojde v průchodných místech plátna k otisku barvy na textil.
6. Pomalým pohybem je jedna strana síta zdvižena od textilu a barva je přežehlána nebo uložena k úplnému zaschnutí.

Princip je znázorněn na obr. 2.5. Při očištění síta po použití je vhodné postupovat velmi šetrně. Při správném zacházení lze vytvořené síto použít opakovaně v řádu několika desítek až stovek procesů tisku. Pomocí speciálních přípravků lze z plátna odstranit i vytvrzenou emulzi.

Šablona lze vytvořit například i tak, že je na síto nanášena mastná vrstva, a to buď

přímo štětcem, nebo přes papírovou šablonu, a poté je plátno pokryto vykrývacím roztokem. Mastná vrstva vykrývací roztok odpudí a ten tak nemůže přilnout k samotnému sítu. Povrch se důkladně omyje a další postup je stejný jako v předchozím případě. Podobných procesů tvorby šablony je více.

Na trhu je několik vodivých barev, vhodných pro tvorbu motivu sítotiskovou metodou. Tyto barvy jsou charakterizovány například teplotními podmínky vytvrzení, obsahem pevných látek apod. Je vhodné se pozastavit nad viskozitou barvy, udávanou jednotkou newton sekunda na metr čtvereční ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$) nebo pascal sekunda ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) a povrchovým napětím udávaným v milinewtonech na metr (mN/m). Tyto dva parametry určují, do jaké míry se barva vstřebá do tkaniny, což může v krajním případě vést i k elektrickému zkratu struktury. Další důležitou vlastností je přilnavost barvy na textil. Obecně jsou vodivé barvy na bázi mědi nevhodné, jelikož na vzduchu dochází k jejich oxidaci. Proto jsou vhodnější barvy na bázi stříbra, niklu nebo jiných vodivých látek za cenu vyšších nákladů. Některé barvy je po tisku nutné zažehlit nebo nechat zaschnout při vyšších teplotách.



Obrázek 2.5 Princip sítotisku

2.5 Inkoustový tisk

Inkoustový tisk je technologie dosahující velmi dobrého rozlišení tisknutého motivu. Každodenně je využívána na úřadech, ve firmách i v domácnostech, a to především pro účely tisku textu a grafické dokumentace.

Výsledek a kvalita tisku závisí především na velikosti inkoustových kapek a rozteči mezi jednotlivými kapkami. V situaci, v níž vytištěný motiv plní pouze informativní úkol a horší parametry tisku pouze sníží sytost barvy nebo kvalitu vzoru, nejsou tyto parametry kritické. V případě tisku, za účelem zajištění elektrické vodivosti motivu, jsou však tyto parametry stěžejní. Malá hustota tisku způsobí nespojitost v motivu, čímž není zajištěna elektrická vodivost. Naopak příliš velká hustota tisku by mohla způsobit špatné zasychání barvy a její následné rozmazání nebo rozpítí. Velikost inkoustové kapky se pohybuje kolem $60\text{ }\mu\text{m}$. Některé tiskárny umožňují nastavení rozteče mezi kapkami. Například tiskárna DMP 2831 od firmy *Dimatix* s piezoelektrickou tiskovou hlavou může tisknout s roztečí kapek v rozmezí $5 - 254\text{ }\mu\text{m}$ [8].

2.6 Plátování

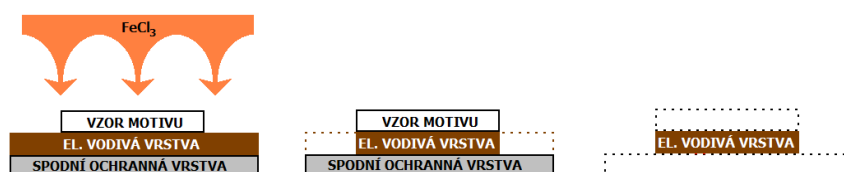
Technologie plátování spočívá v na nanesení tenkých kovových plátů na podklad. Jedná se o velmi jednoduchou a levnou alternativu, kterou lze realizovat i v domácích podmínkách s minimálním technickým vybavením. Výrobu motivu z tenké vodivé vrstvy lze provést několika způsoby.

Nejjednodušším způsobem je ruční vystřížení motivu z fólie přímo, ovšem za cenu malé přesnosti a lze tak realizovat pouze jednoduché tvary motivu. Při pečlivé práci s fólií lze i tak dosáhnout velmi dobrých výsledků.

Přesnějším, ale stále dostupným způsobem je vytvoření motivu pomocí leptání v chloridu železitém. Proces se v zásadě příliš neliší od postupu při výrobě motivu na standardním pevném substrátu:

1. Na řezacím plotteru je vytvořen pozitivní vzor motivu v měřítku 1:1, a to na samolepící voděodolný papír nebo plastovou fólii. Motiv není zrcadlově obrácen.
2. Vytvořený vzor je nalepen na horní stranu vodivé vrstvy. Pokud tomu tak není od výrobce, je nalepen voskovaný papír na spodní stranu vodivé vrstvy, a to po celé jeho ploše.
3. K zamezení přítomnosti vzduchových bublin je připravená struktura narovnána.
4. Do mírně předehřátého leptacího roztoku chloridu železitého (FeCl_3) je vložena připravená struktura na 10 – 30 minut, dle vlastností konkrétní leptací lázně.
5. Po vyleptání motivu je nutné strukturu co nejdříve očistit a odstranit ochranné vrstvy z důvodu zamezení prosáknutí roztoku přes ochrannou vrstvu, a také kvůli možnému obtížnému odstranění vrstvy po zaschnutí lepidla. Standardní samolepící papír je vhodné odstranit do dvou hodin od nalepení.

Princip je znázorněn na obr. 2.6.



Obrázek 2.6 Princip leptání fólie

Další variantou výroby motivu je automatizované laserové řezání. Jde o nejpřesnější metodu, avšak za cenu vyšších nákladů.

3 NUMERICKÝ MODEL

Kapitola pojednává o postupech a výsledcích simulace navrhované antény pomocí programu CST Microwave Studio®. Model základního návrhu se skládá ze tří vrstev. Anténní motiv a mikropáskové vedení je vytvořeno z dokonale elektricky vodivého modelu materiálu (PEC). Druhou vrstvou je substrát, který reprezentuje nevodivou textilií o definované šířce w_{SUB} , délce l_{SUB} , tloušťce h_{SUB} , relativní permitivitě ϵ_r a ztrátovém úhlu $\tan \delta$. Zemní deska je vytvořena pomocí modelu dokonale vodivého materiálu. Veškeré simulace byly řešeny pomocí analýzy v časové doméně v pásmu 1 – 5 GHz. Směr šíření elektromagnetické vlny antény v kartézské souřadnicové soustavě je v celé práci orientován rovnoběžně s osou z . Zobrazení velikosti intenzity elektrického pole (E - rovina) odpovídá rovině yz a velikost intenzity magnetického pole (H - rovina) odpovídá rovině xz .

3.1 Anténní motiv na substrátu

Prvním modelem numerické simulace je flíčková anténa s lineární polarizací umístěná na bavlnu s přidaným polyesterem v poměru 65:35 (CO/PES). Druhým modelem je flíčková anténa umístěná na 100% polyester s označením fleece. Výsledky simulací jsou uváděny paralelně pro oba modely antén. Pro rozlišení modelů jsou výsledky označeny dle použitého materiálu dielektrika, avšak jedná se o dva rozdílné modely navržené na rezonanční frekvenci 2,45 GHz. Výchozí rozměry vychází z návrhu z kapitoly 1.3. Po optimalizaci jsou výsledné rozměry pro oba modely uvedeny v tab. 3.1. K vybuzení vidu byl použit vlnovodný port a k napájení struktury bylo použito mikropáskové vedení s charakteristickou impedancí 50 Ω . Pro impedanční přizpůsobení struktury byly u hrany flíčkového motivu zavedeny mezery o šířce w_{SPACE} a délce l_{SPACE} . Hodnoty činitele odrazu na vstupu S_{11} a šířky pásma pro S_{11} při -10 dB jsou uvedeny v tab. 3.2.

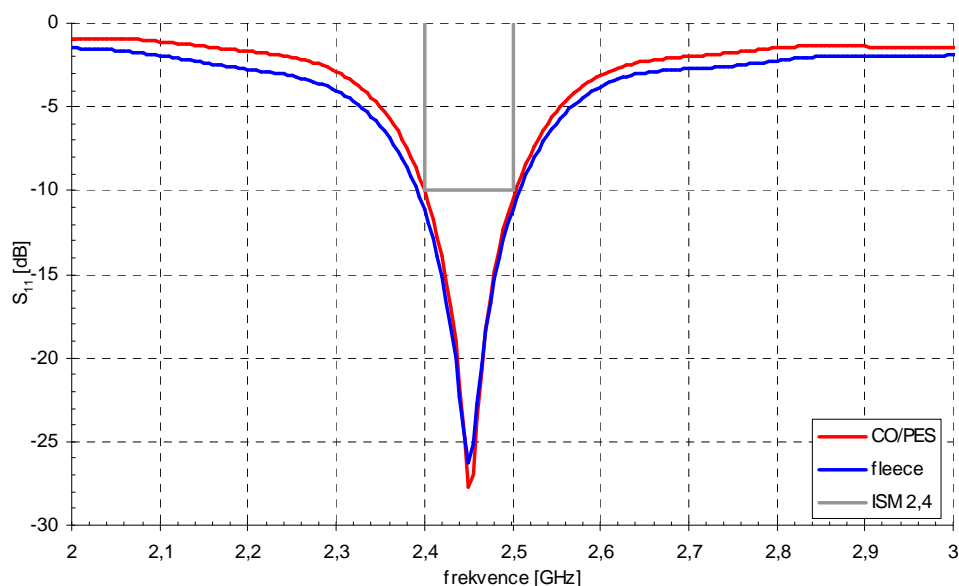
Tabulka 3.1 Rozměry modelované flíčkové antény

		CO/PES	fleece
ϵ_r	[-]	1,48	1,07
$\tan \delta$	[-]	0,02	0,02
f_{REZ}	[GHz]	2,45	2,45
h_{SUB}	[mm]	3	3
w_{SUB}	[mm]	150	150
l_{SUB}	[mm]	150	150
w_{PATCH}	[mm]	56,50	61,73
l_{PATCH}	[mm]	48,30	55,76
w_{SPACE}	[mm]	0,50	1,67
l_{SPACE}	[mm]	16,30	15,62

Tabulka 3.2 Výsledky simulace základní struktury

		CO/PES	fleece
f_{REZ}	[GHz]	2,45	2,449
$S_{11}(f_{\text{REZ}})$	[dB]	-27,8	-26,1
$BW_{S_{11}(-10\text{dB})}$	[MHz]	100	102

Výsledky činitele odrazu v rozsahu 2 – 3 GHz jsou uvedeny v obr. 3.1. Požadované frekvenční pásmo je pokryto a šířka svazku se pohybuje kolem 60° v obou rovinách. Zisk v maximu hlavního laloku je vždy přes 5,9 dB. Vychýlení maxima hlavního vyzařovacího laloku v rovině E je způsobeno parazitními ztrátami energie z mikropáskového vedení, které tvar směrového diagramu ovlivňují.

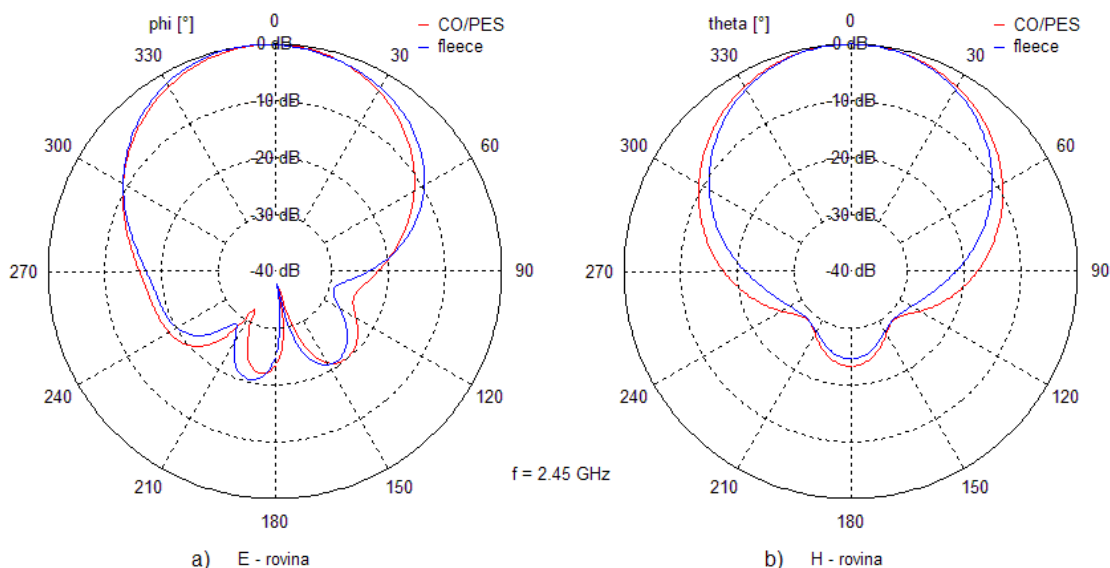


Obrázek 3.1 Činitel odrazu základní struktury antény

Níže uvedené směrové diagramy anténní struktury z obr. 3.2 a parametry z tab. 3.3 mohou být pokládány za referenční, pro další simulace z následujících kapitol. Směrové parametry jsou sledovány na střední frekvenci a obou krajních frekvencí pásma ISM pro 2,4 – 2,5 GHz. Zisk je v celé práci vztažen k izotropnímu zářiči a vždy se jedná o realizovaný zisk v dB. Pokles úrovně bočního laloku je vztažen k maximu hlavního laloku.

Tabulka 3.3 Parametry směrových diagramů základní struktury

	E - rovina					H - rovina			
	frekvence	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku
	[GHz]	[dB]	[°]	[°]	[dB]	[dB]	[°]	[°]	[dB]
CO/PES	2,4	6,67	2	62,8	-19,1	6,66	0	66,4	-22,8
	2,45	7,21	2	61,3	-20,1	7,20	0	66,3	-23,3
	2,5	6,96	2	60,0	-21,2	6,94	0	66,2	-24,0
fleece	2,4	5,90	1	79,2	-21,0	5,90	0	60,1	-28,4
	2,45	6,95	7	68,7	-20,4	6,80	0	59,8	-24,6
	2,5	7,28	8	55,9	-18,6	7,00	0	59,9	-21,8



Obrázek 3.2 Směrový diagram základní struktury na 2,45 GHz

Prvním pozorováním byla změna výšky substrátu na $h_{\text{SUB}} = 5$ mm. Lze tak porovnat změnu parametrů při volbě stejného materiálu, pro stejnou pracovní frekvenci. Použitím vztahů (1) až (9) a následnou optimalizací získáváme nové rozměry flíčku (viz tab. 3.4).

Tabulka 3.4 Rozměry optimalizované struktury

		CO/PES	fleece
h_{SUB}	[mm]	5	5
w_{PATCH}	[mm]	54,98	60,2
l_{PATCH}	[mm]	47,40	54
w_{SPACE}	[mm]	2,00	1,67
l_{SPACE}	[mm]	15,31	13,86

Ostatní rozměry zůstávají stejné jako v předchozím případě. Výsledky simulace jsou uvedeny v tab. 3.5. Při této změně nedošlo k posunu rezonanční frekvence. U varianty CO/PES došlo ke zmenšení šířky pásma o 9%, naproti tomu u varianty s fleecem došlo ke zvětšení šířky pásma o 52%. Obecně lze u flíčkových antén zvětšením výšky substrátu očekávat zvětšení šířky pásma.

Tabulka 3.5 Výsledky simulace struktury s vyšším substrátem

		CO/PES	fleece
f_{REZ}	[GHz]	2,445	2,45
$S_{11}(f_{\text{REZ}})$	[dB]	-30,8	-21,5
$BW_{S11(-10\text{dB})}$	[MHz]	91	155

Směrové parametry uvedené v tab. 3.6 jsou obdobné předchozímu případu. Došlo ke mírnému zvýšení zisku v hlavním laloku.

Tabulka 3.6 Parametry směrových diagramů struktury s vyšším substrátem

		E - rovina				H - rovina			
	frekvence	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku
	[GHz]	[dB]	[°]	[°]	[dB]	[dB]	[°]	[°]	[dB]
CO/PES	2,4	8,84	1	63,3	-19,3	8,84	0	65,8	-28,1
	2,45	9,35	1	61,3	-20,6	9,34	0	65,4	-30,9
	2,5	8,84	1	59,8	-22,1	8,84	0	65,2	-
fleece	2,4	6,98	6	76,9	-22,9	6,93	0	60,7	-28,2
	2,45	7,45	1	73,6	-23,3	7,45	0	60,0	-29,6
	2,5	7,71	4	66,8	-22,9	7,65	0	59,6	-

3.2 Vliv blízkosti lidské tkáně

Lidské tělo disponuje elektrickými vlastnostmi, které mohou zásadně ovlivnit funkci a parametry antény. Vyšetření vlivu lidského těla se provádí i v případech, kdy je přítomnost člověka v blízkosti antény pouze pravděpodobná. U nositelných antén se tedy jedná o nutnost, protože v závislosti na pracovní frekvenci a vzdálenosti od tkáně může docházet k posunu rezonanční frekvence, zhoršení impedančního přizpůsobení nebo deformaci směrových charakteristik.

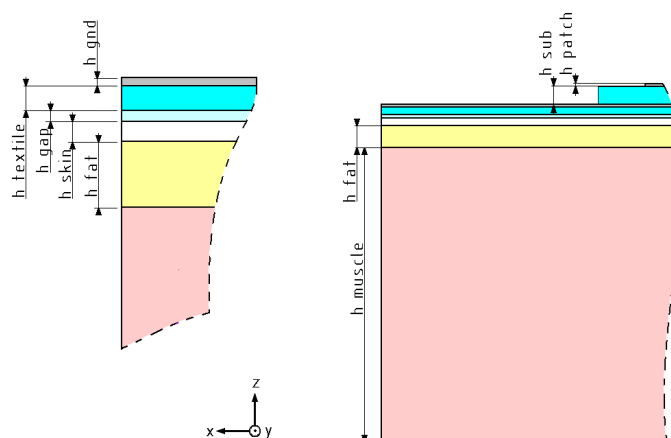
Pro co nejvěrohodnější simulaci modelu antény upevněného na lidském těle je pod zemní vodivou vrstvou umístěna nosná textilie $h_{\text{TEXTILE}} = 1 \text{ mm}$; $w_{\text{TEXTILE}} = 250 \text{ mm}$; $l_{\text{TEXTILE}} = 250 \text{ mm}$; $\epsilon_r = 1,48$; $\tan \delta = 0,02$. Ta simuluje vrstvu oděvu, na kterém je anténa umístěna. Pod vrstvou textilu je umístěna vrstva vakua adekvátní mezeře mezi oděvem a lidským tělem ($h_{\text{GAP}} = 0,5 \text{ mm}$).

Následují samotné vrstvy lidské tkáně. CST Microwave Studio® má k dispozici rozsáhlou knihovnu materiálů, které lze v modelu využít. Nicméně materiály pro modelování lidské tkáně jsou definovány relativní permitivitou závislou na frekvenci, nikoliv však měrnou vodivostí. Abychom vyloučili zavedení chyby, model lidské tkáně bude také vytvořen použitím parametrů z [17]. Použité hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.7. Výsledky simulací při použití obou modelů jsou dále porovnávány.

Tabulka 3.7 Parametry použitých modelů lidské tkáně

	model lidské tkáně		
	Bio Tissues CST®	ITIS Foundation model [17] pro $f = 2,45 \text{ GHz}$	
	$\epsilon_r 2,45\text{GHz}[-]$	$\epsilon_r [-]$	$\sigma [\text{S/m}]$
kůže	38,0	38,1	1,46
tuk	5,28	10,8	0,268
svalovina	52,7	52,7	1,74

Použitá výška vrstvy simulující kůži h_{SKIN} je 1mm, vrstva tuku je vysoká h_{FAT} 3 mm a vrstva svaloviny h_{MUSCLE} 40 mm vysoká. Tyto hodnoty jsou při modelování lidské tkáně běžně používány [18]. Průřez modelem lidské tkáně je znázorněn na obr. 3.3.



Obrázek 3.3 Model lidské tkáně

V tab. 3.8 a 3.9 jsou uvedeny výsledky simulace za použití obou modelů lidské tkáně. Testovaným motivem je anténa s výškou substrátu $h_{\text{SUB}} = 3$ mm. Nejvýraznější je rozdíl v šířce pásma pro $S_{11} -10$ dB a došlo ke zvýšení rezonanční frekvence v rámci 10 – 20 MHz.

Tabulka 3.8 Výsledky simulací pro dva modely lidské tkáně

		CO/PES		fleece	
		Bio Tissues (CST)	ITIS model [17]	Bio Tissues (CST)	ITIS model [17]
f_{REZ}	[GHz]	2,46	2,47	2,46	2,46
$S_{11}(f_{\text{REZ}})$	[dB]	-36,1	-37,3	-31,6	-26,9
$BW_{S_{11}(-10\text{dB})}$	[MHz]	112	125	110	110

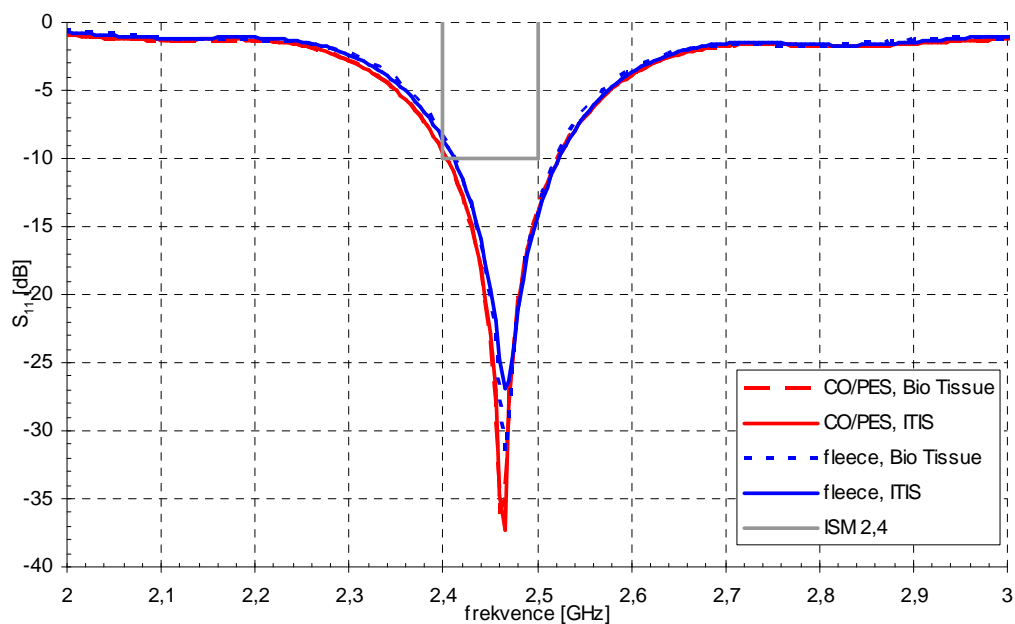
Tabulka 3.9 Parametry směrových charakteristik pro dva modely lidské tkáně

		E - rovina					H - rovina			
		frekvence	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku
		[GHz]	[dB]	[°]	[°]	[dB]	[dB]	[°]	[°]	[dB]
CO/PES	*CST	2,4	5,92	1	70,2	-21,0	5,94	0	67,6	-23,7
		2,45	6,54	1	66,8	-21,9	6,53	0	66,8	-23,9
		2,5	6,61	1	63,7	-22,7	6,66	0	66,1	-24,0
	*ITIS	2,4	5,83	1	71,4	-21,3	5,83	0	68,0	-24,3
		2,45	6,48	1	67,8	-22,2	6,48	0	66,9	-24,8
		2,5	6,59	1	64,7	-23,1	6,59	0	66,2	-25,0
fleece	*CST	2,4	5,94	1	67,5	-23,5	5,94	0	72,4	-26,8
		2,45	6,69	2	65,3	-25,0	6,68	0	70,5	-28,0
		2,5	6,78	3	63,2	-25,0	6,75	0	68,8	-30,7
	*ITIS	2,4	6,33	2	59,3	-19,6	6,32	0	64,9	-27,3
		2,45	6,93	2	58,7	-20,7	6,92	0	64,3	-28,3
		2,5	6,95	1	58,3	-20,9	6,94	0	63,8	-29,2

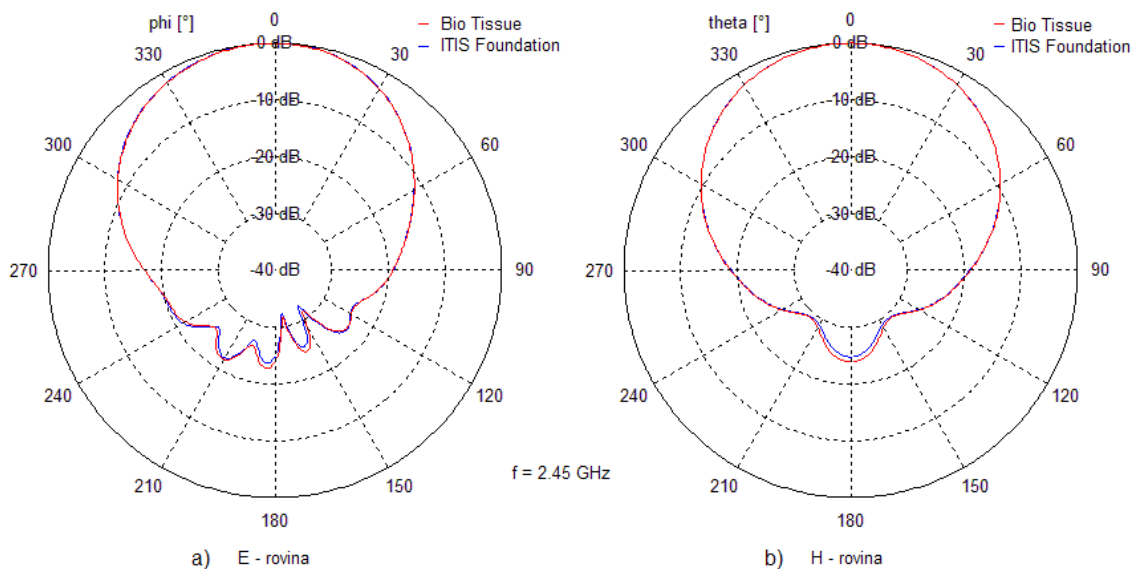
*CST – model z knihovny Bio Tissue

*ITIS – model dle [17]

Ze směrových charakteristik lze porovnat rozdíly dvou použitých modelů lidské tkáně. Oba modely tedy vykazují srovnatelné výsledky. Nejvýraznější rozdíly jsou patrné z hodnot velikostí vyzařovacího úhlu a úrovně bočního laloku. V dalších simulacích bude však použit pouze model z [17]. Zavedením lidské tkáně do modelu došlo k mírnému posunutí rezonanční frekvence a zvětšení šířky. Oproti původnímu modelu nedošlo k výrazné změně šířky vyzařovacího úhlu. (obr. 3.4 a obr. 3.5).



Obrázek 3.4 Činitel odrazu při použití dvou modelů lidské tkáně

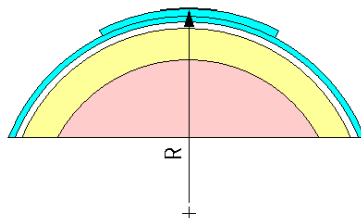


Obrázek 3.5 Směrové charakteristiky pro dva modely lidské tkáně na 2,45 GHz

3.3 Ohyb struktury

V dosavadních simulacích byl vždy použit plochý motivu modelu. Tento model představuje situaci umístění antény na záda, břicho nebo hrudník. Tato kapitola pojednává o možnosti umístění anténní struktury na rameno, paži, nebo na dolní končetinu. Povrch anténa kopíruje povrch imaginárního válce s orientací dle osy x

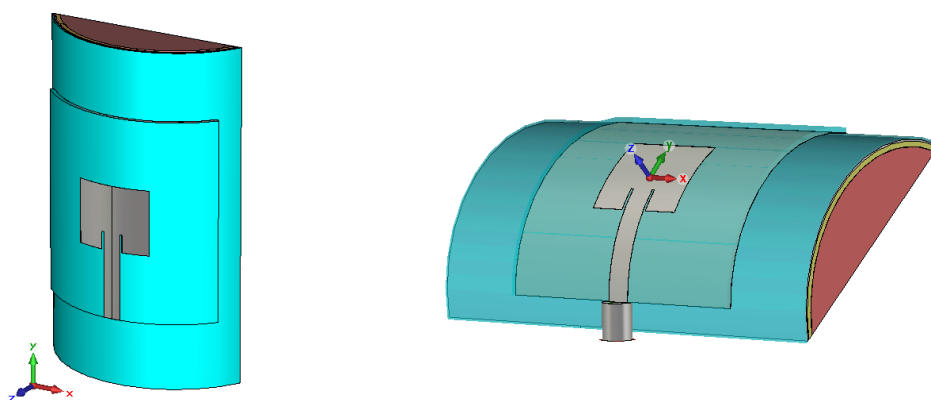
nebo y , přičemž poloměr ohnutí je vždy vztažen k anténnímu motivu, jak je znázorněno na obr. 3.6. Z důvodu snížení výpočetní náročnosti je model válce s tkání redukován na válcový vrchlík.



Obrázek 3.6 Obecný model ohybu struktury

3.3.1 Konkávní ohyb

Simuluje ohyb na stehně s poloměrem $R = 90$ mm podél osy y a x (obr. 3.7). Vzhledem k zakřivení struktury není vhodné použití vlnovodného portu k napájení. Nedokonalé navázání mezi portem a mikropáskovým vedením vede k odrazu části energie zpět ke zdroji a zatížení výsledků chybou. V některých případech ohybu toto přímé navázání použitý software ani nedovoluje, jelikož model vlnovodného portu vyžaduje na svém výstupu delší homogenní úsek. Proto je vhodnější použití pomocného koaxiálního vedení s charakteristickou impedancí $50\ \Omega$ umístěného mezi vlnovodným portem a mikropáskovým vedením. V následujících modelech bylo použito koaxiální vedení s průměrem vnitřního vodiče $d_{IN} = 4,92$ mm; průměrem pláště $d_{OUT} = 16$ mm a dielektrikem s $\epsilon_r = 2$. Pro porovnání jsou u prvního modelu uvedeny výsledky obou typů napájení (tab. 3.10).



Obrázek 3.7 Obecný model ohybu podél osy y (vlevo) a x (vpravo)

Tabulka 3.10 Výsledky porovnání dvou způsobů napájení při R90 osy y

		CO/PES		fleece	
		vlnovodný port	koaxiální vedení	vlnovodný port	koaxiální vedení
f_{REZ}	[GHz]	2,42	2,435	2,44	2,445
$S_{11}(f_{\text{REZ}})$	[dB]	-33,1	-41,2	-12,1	-22,2
$BW_{S_{11}(-10\text{dB})}$	[MHz]	109	145	50	130

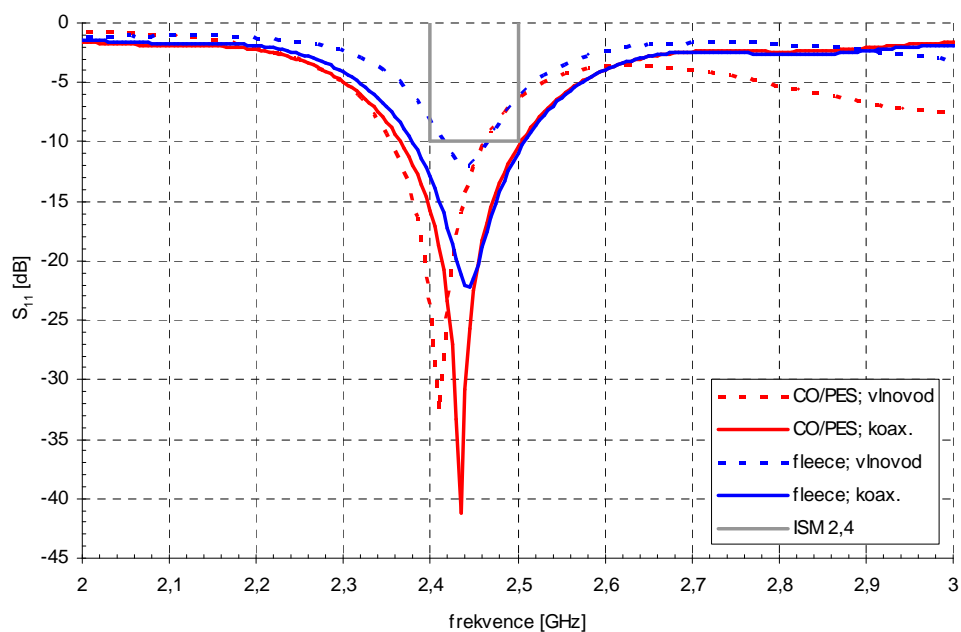
Na kmitočtu 2,45 GHz je oproti původní struktuře (tab. 3.3) změna zisku antény v rozmezí $\pm 1,5$ dB při napájení koaxiálním vedením (tab. 3.11). V rovině E došlo k zúžení šířky hlavního svazku až o 13° . Naopak v rovině H došlo k rozšíření vyzařovacího úhlu o 5° . Porovnání průběhu činitele odrazu je uvedeno na obr. 3.8.

Tabulka 3.11 Parametry směrových charakteristik dvou způsobů napájení při R90 osy y

		E - rovina					H - rovina			
		frekvence	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku
		[GHz]	[dB]	[°]	[°]	[dB]	[dB]	[°]	[°]	[dB]
CO/PES	V	2,45	10,00	3	68,3	-16,4	10,00	0	73,9	-19,9
	K	2,45	6,75	4	55,5	-16,3	5,64	0	69,5	-17,5
fleece	V	2,45	10,70	2	60,5	-12,0	10,70	0	65,0	-19,3
	K	2,45	7,22	4	55,8	-19,4	6,13	0	65,0	-19,3

*V - napájení pomocí vlnovodného portu

*K - napájení pomocí koaxiálního vedení



Obrázek 3.8 Činitel odrazu dvou způsobů napájení při R90 osy y

Extrémnějším případem je uložení antény na paži. V tomto případě je model flíčkové antény ohnut poloměrem 40 mm. Model je v tomto a všech následujících případech napájen koaxiálním vedením z důvodu popsaného výše. V tab. 3.12 a tab. 3.13 jsou uvedeny výsledky pro oba poloměry dvou orientací ohybu. Směrové vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3.14. Model je více náchylný na ohyb ve směru x , jak vyplývá z obr. 3.9 a 3.10. Ve všech případech došlo ke zvětšení šířky pásma o 30 až 50 %.

Tabulka 3.12 Výsledky simulací dvou poloměrů ohybu kolem osy y

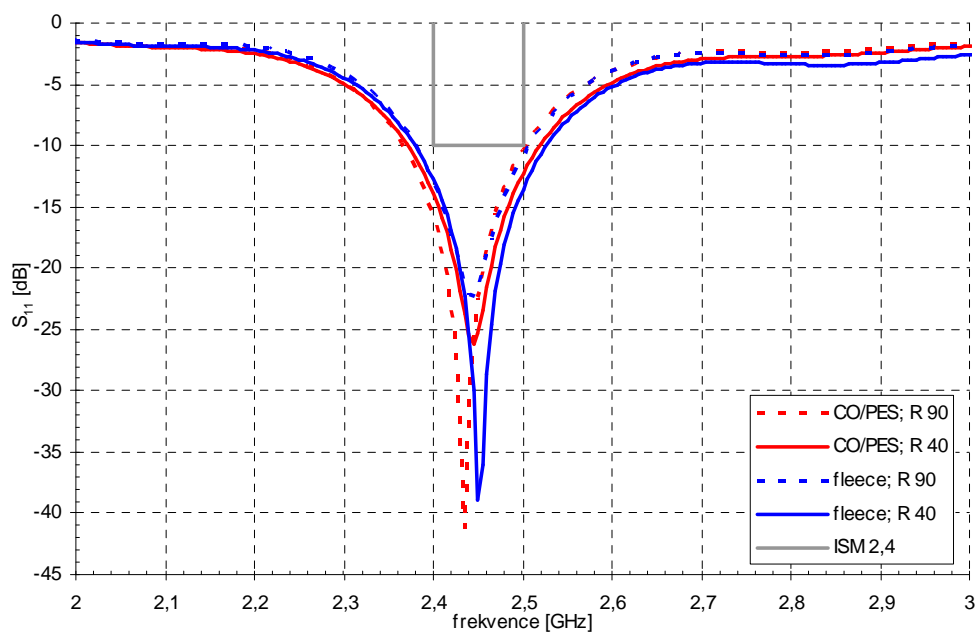
		CO/PES		fleece	
		R = 90 mm	R = 40 mm	R = 90 mm	R = 40 mm
f_{REZ}	[GHz]	2,435	2,445	2,445	2,45
$S_{11}(f_{\text{REZ}})$	[dB]	-41,2	-26,2	-22,2	-38,9
$BW_{S11(-10\text{dB})}$	[MHz]	145	145	130	150

Tabulka 3.13 Výsledky simulací dvou poloměrů ohybu kolem osy x

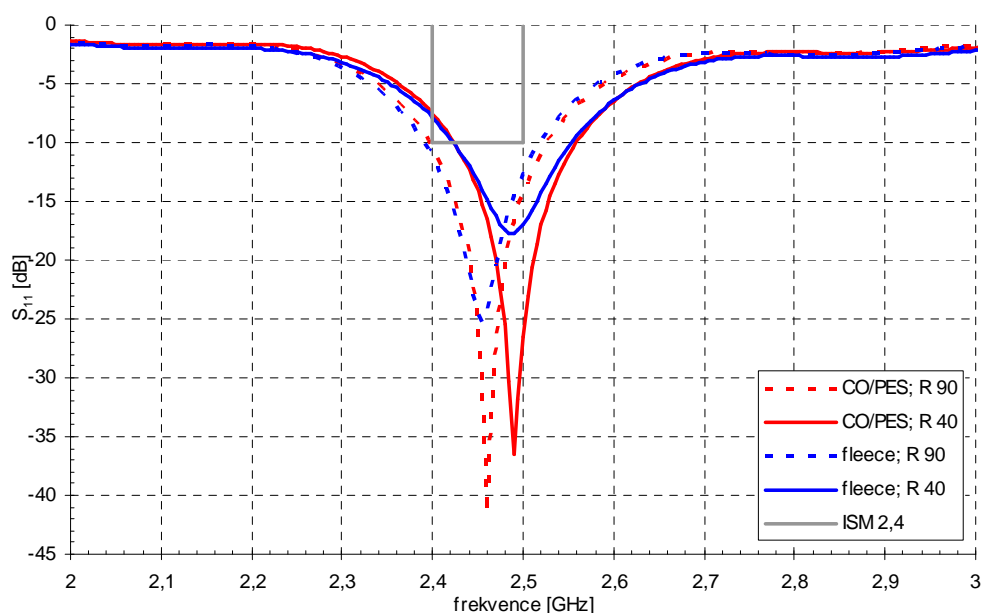
		CO/PES		fleece	
		R = 90 mm	R = 40 mm	R = 90 mm	R = 40 mm
f_{REZ}	[GHz]	2,46	2,49	2,455	2,49
$S_{11}(f_{\text{REZ}})$	[dB]	-41,5	-36,6	-25,3	-17,6
$BW_{S11(-10\text{dB})}$	[MHz]	130	140	130	130

Tabulka 3.14 Parametry směrových charakteristik dvou poloměrů ohybu y a x

			E - rovina					H - rovina			
			f	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku
			[GHz]	[dB]	[°]	[°]	[dB]	[dB]	[°]	[°]	[dB]
CO/PES	osa y	R90	2,45	6,75	4	55,5	-16,3	5,64	0	69,5	-17,5
		R40	2,45	6,28	17	54,6	-15,4	4,92	0	77,3	-
	osa x	R90	2,45	4,81	26	104,2	-13,5	3,91	0	68,5	-14,2
		R40	2,45	4,77	5	72,4	-7,9	4,7	0	64,7	-7,5
fleece	osa y	R90	2,45	7,22	4	55,8	-19,4	6,13	0	65,0	-14,6
		R40	2,45	6,95	18	48,9	-13,7	5,21	0	70,7	-
	osa x	R90	2,45	5,13	13	87,8	-11,9	4,88	0	65,0	-19,3
		R40	2,45	4,73	1	64,9	-5,9	4,73	0	58,5	-5,9



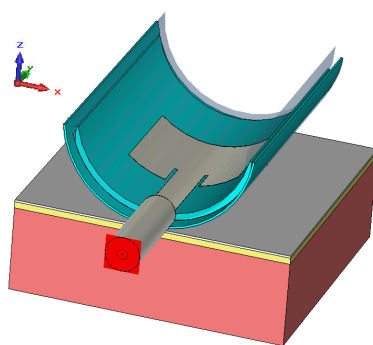
Obrázek 3.9 Činitel odrazu pro dva poloměry ohnutí kolem osy y



Obrázek 3.10 S_{11} dvou poloměrů ohybu kolem osy x

3.3.2 Konvexní ohyb

Při umístění struktury např. na hrudník může nastat situace, kdy se oděv s anténní strukturou prohne konvexně (obr. 3.11). Poloměr zakřivení struktury, je stejně jako v předchozím případě, vztažen k ploše flíčku. Konvexní ohyb je testován při orientaci imaginárního válce ve směru x , a ve směru y . U obou případů je poloměr $R = 40$ mm. Z tab. 3.15 vyplývá, že konvexní ohyb struktury v ose x snížil hodnotu rezonanční frekvence až o 90 MHz. Výsledky simulace ohybu dle osy y jsou nejednoznačné, protože povaha výsledků vzorku CO/PES neodpovídá vzorku fleece. Směrové vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3.16. Průběhy S_{11} pro oba případy jsou znázorněny na obr. 3.12.



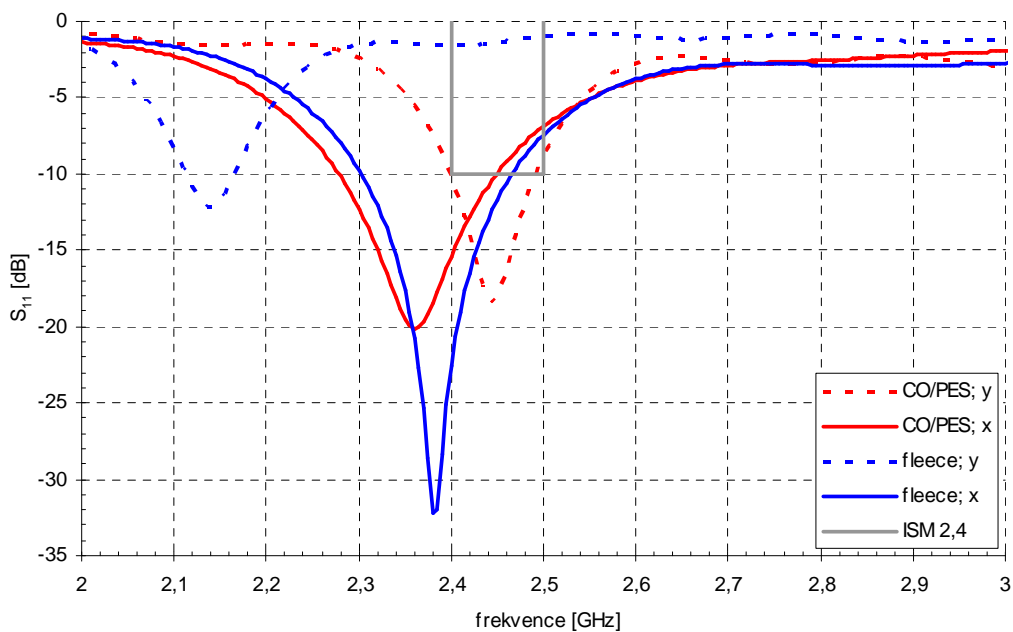
Obrázek 3.11 Obecný model konvexního ohybu

Tabulka 3.15 Výsledky simulace pro dvě orientace konvexního ohybu při R40

		CO/PES		fleece	
		ohyb: osa y	ohyb: osa x	ohyb: osa y	ohyb: osa x
f_{REZ}	[GHz]	2,45	2,36	2,14	2,38
$S_{11}(f_{\text{REZ}})$	[dB]	-18,5	-20,2	-12,2	-32,2
$BW_{S_{11}(-10\text{dB})}$	[MHz]	92	171	50	160

Tabulka 3.16 Parametry směrových charakteristik konvexního ohybu ve dvou směrech při R40

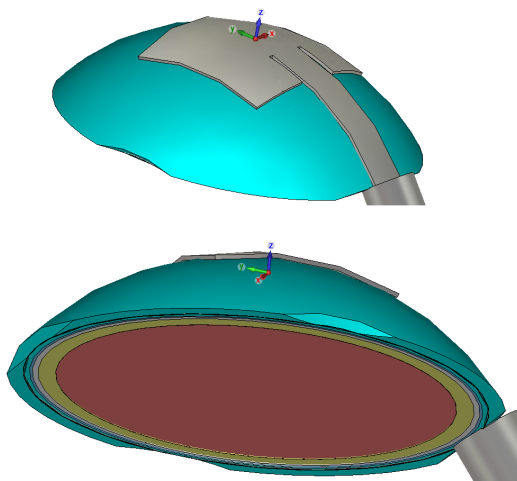
		E - rovina					H - rovina			
		f	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku
		[GHz]	[dB]	[°]	[°]	[dB]	[dB]	[°]	[°]	[dB]
CO/PES	osa y	2,45	4,43	8	70,8	-23,0	4,19	0	73,0	-
	osa x	2,45	5,76	17	72,6	-7,0	4,86	0	72,2	-14,1
fleece	osa y	2,45	-3,10	5	57,9	-16,0	-3,18	0	77,2	-17,7
	osa x	2,45	5,97	18	67,8	-6,1	4,74	0	66,0	-13,6



Obrázek 3.12 Činitel odrazu pro rozdílné orientace konvexního ohybu pro R40

3.3.3 Ohyb po povrchu koule

V poslední simulaci anténa i model lidské tkáně kopírují povrch koule (viz obr 3.13). Poloměr v místě motivu je $R = 50$ mm a model tak má napodobit podmínky, kdy je anténa umístěna na kulovité ploše (např. koleno nebo rameno). Z výsledků uvedených v tab. 3.17, 3.18 a obr.3.14 vyplývá, že se jedná o nejnepříznivější podmínky pro funkci antény. Rezonanční frekvence je posunuta až o 120 MHz a zisk v požadovaném pásmu 2,4 – 2,5 GHz klesl pod 5 dB.



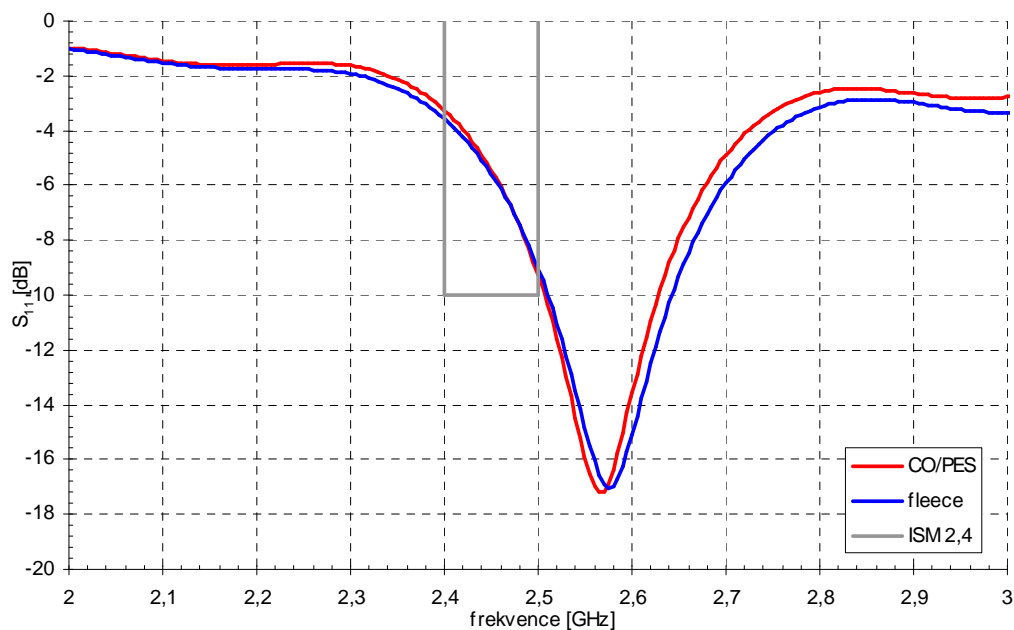
Obrázek 3.13 Obecný model struktury ohybu po povrchu koule R50

Tabulka 3.17 Výsledky simulace pro ohyb po povrchu koule R50

		CO/PES	fleece
f_{REZ}	[GHz]	2,57	2,59
$S_{11}(f_{\text{REZ}})$	[dB]	-17,2	-16,2
$BW_{S_{11}(-10\text{dB})}$	[MHz]	127	131

Tabulka 3.18 Parametry směrových charakteristik pro ohyb po povrchu koule R50

	E - rovina					H - rovina			
	f	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku
	[GHz]	[dB]	[°]	[°]	[dB]	[dB]	[°]	[°]	[dB]
CO/PES	2,45	3,8	7	72,9	-4	3,66	0	72	-19,7
fleece	2,45	4,91	4	57,1	-7,9	4,85	0	69,9	-11,2



Obrázek 3.14 Činitel odrazu při ohybu struktury po povrchu koule R 50

3.4 Srovnání výsledků s literaturou

V [19] byl simulován model flíčkové antény pro pracovní frekvenci 2,45 GHz s kruhovou polarizací, napájený koaxiální sondou. Byl použit pěnový substrát výšky 3,94 mm, s relativní permitivitou $\epsilon_r = 1,52$ a ztrátovým činitelem $\tan \delta 0,012$. Uvedená struktura byla v obou směrech konkávně ohnuta s poloměrem 40 mm obdobně jako v kapitole 3.3. Vzhledem k použití kruhové polarizace, která poskytuje větší šířku pásma, nelze tento parametr hodnotit.

Ohybem motivu ve směru x došlo ke zvýšení rezonanční frekvence o cca 80 MHz. Ve sledovaném pásmu došlo také ke zhoršení činitele odrazu až o 8 dB. Ohybem ve směru y bylo posunutí rezonanční frekvence méně výrazné, jelikož došlo ke snížení rezonanční frekvence cca o 20 MHz. Hodnota S_{11} na rezonanční frekvenci 2,48 GHz zůstala na původní úrovni -25 dB. Šířka vyzařovacího laloku se v obou rovinách zvětšil v řádu několika stupňů, a došlo k poklesu zisku o cca 0,6 dB.

Model lidské tkáně byl v [19] vytvořen pomocí jedné vrstvy válce s $\epsilon_r = 42$ a $\sigma = 0,99$ S/m. V práci není uveden případ, kdy je na lidskou tkáň uložen anténní motiv bez ohybu. V případě ohybu o poloměru 40 mm s lidskou tkání byla hodnota rezonanční frekvence přibližně o 40 MHz nižší než v případě bez lidské tkáně. Impedanční přizpůsobení na rezonanční frekvenci se zhoršilo o cca 3 dB oproti situaci bez modelu lidské tkáně. Ve všech výše uvedených případech zůstalo pásmo 2,4 – 2,5 GHz s dostatečnou rezervou pokryto.

Výsledky získané v [19] i přes odlišnosti v modelu antény a modelu lidské tkáně jsou srovnatelné s obdržnými výsledky z kapitoly 3.3.1.

V [18] byla použita vyšíváná AMF dipólová anténa, pro frekvenci 600 MHz. V prvním případě byla anténní struktura umístěna volně do prostoru a v druhém případě

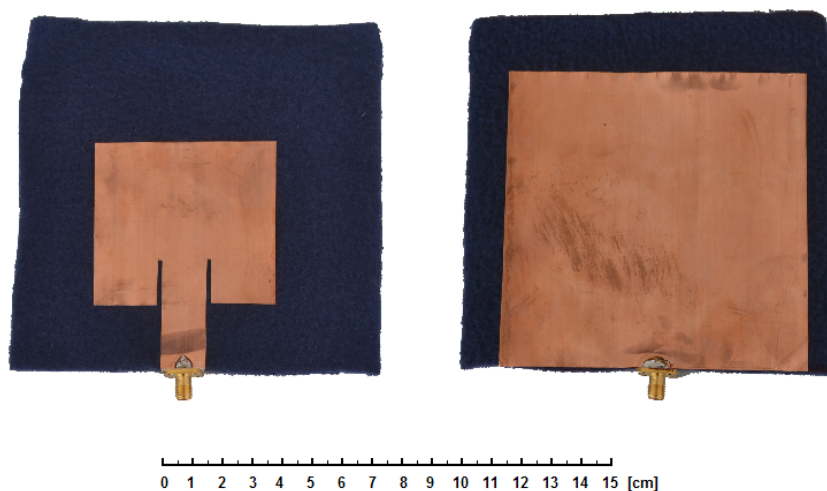
byla vzdálena 12 mm od třívrstvého modelu lidské tkáně (kůže $h_{\text{SKIN}} = 1$ mm; $\epsilon_{\text{rSKIN}} = 43,75$; $\sigma_{\text{SKIN}} = 0,76$ S/m; tuk $h_{\text{FAT}} = 3$ mm; $\epsilon_{\text{rFAT}} = 5,52$; $\sigma_{\text{FAT}} = 0,04$ S/m; svalovina $h_{\text{MUSCLE}} = 40$ mm; $\epsilon_{\text{rMUSCLE}} = 56,01$; $\sigma_{\text{MUSCLE}} = 0,85$ S/m;) Umístěním antény 12 mm od modelu lidské tkáně se rezonanční frekvence snížila přibližně o 60 MHz. Impedanční přizpůsobení se zhoršilo přibližně o 11 dB.

4 REALIZACE

V této kapitole jsou popsány postupy a metody výroby vzorků nositelných antén a následně jsou dle možností změřeny jejich parametry. Pro laboratorní účely je napájení antény zajištěno panelovým SMA konektorem 32K441-500L5 firmy *Rosenberger* [20]. Pro pásmo ISM 2,4 GHz je vhodnější použití např. menšího MMCX konektoru [21].

4.1 Plátování

Metodou popsanou v kapitole 2.6 je vyrobena anténa na fleecovém textilu o výšce 3 mm s gramáží 272 g/m² (obr.4.1). Jako elektricky vodivý materiál byla použita měděná fólie s výškou 0,04 mm s již nanesenou vrstvou elektricky vodivého lepidla [7]. SMA konektor je k anténě připojen pomocí pájení. K minimalizaci poškození textilních vláken vlivem vysoké teploty musí být pájení omezeno na nezbytně nutnou dobu.

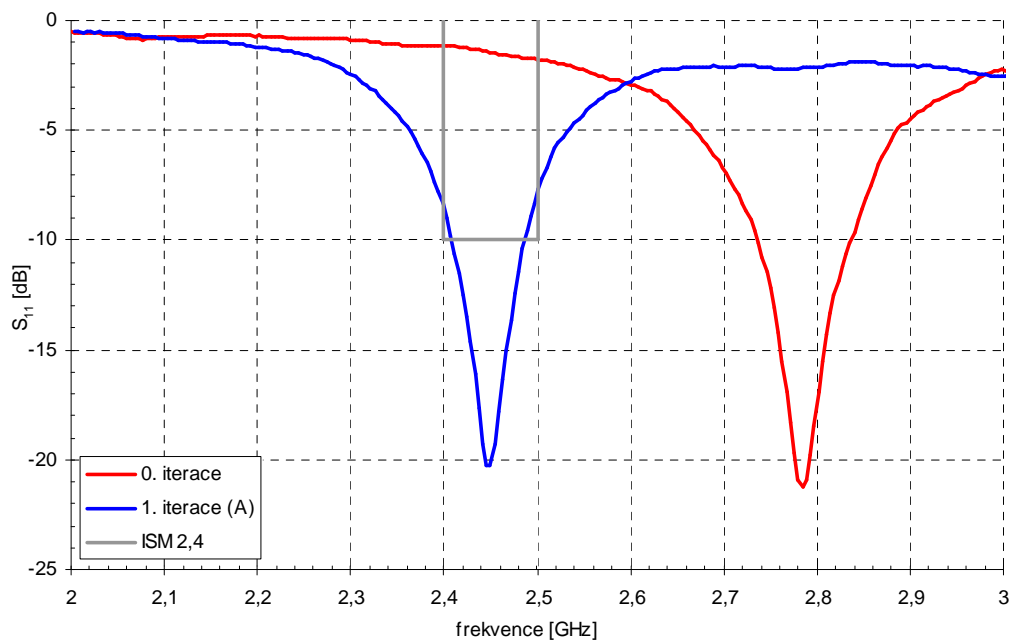


Obrázek 4.1 Flíčková anténa realizovaná pomocí měděné fólie

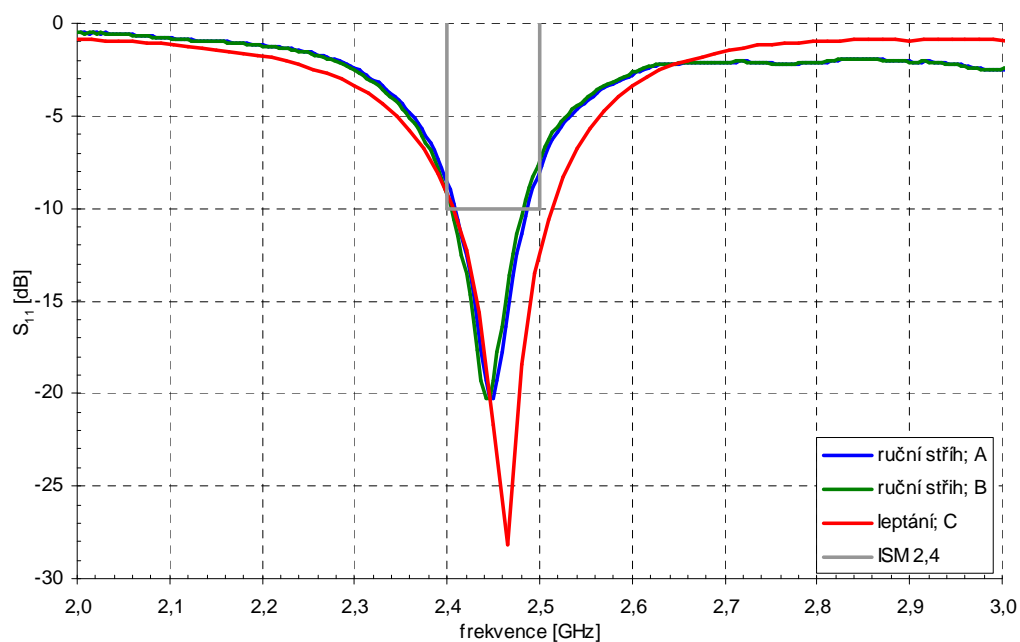
4.1.1 Určení relativní permitivity substrátu

Při návrhu prvního vzoru byla neznámou hodnotou relativní permitivity ϵ_r použitého fleecového textilu. Stanovena byla první iterací metody reverzního určení popsanou v kapitole 1.4 (obr. 4.2). Vstupní hodnotou bylo $\epsilon_r = 1,5$. Konečná stanovená hodnota relativní permitivity konkrétního fleecového substrátu je $\epsilon_r = 1,07$. Aby bylo možné sledovat vliv přesnosti ruční výroby a zároveň zaručení spolehlivosti výsledku, byly stejným způsobem vyhotoveny dva totožné vzorky. Motiv vzorku A a B byl vyroben ručním vyřezáním. Motiv C byl vyroben pomocí leptacího roztoku. Postup výroby motivu C je popsán v kapitole 2.6. U vzorků A, B došlo vůči simulaci k posunu

rezonanční frekvence v řádu jednotek MHz, avšak hůře pokrývá požadované frekvenční pásmo. Naproti tomu vzorek C při větším posunu rezonanční frekvence, lépe pokrývá i horní mez frekvenčního pásma (obr.4.3).



Obrázek 4.2 Činitel odrazu při určení relativní permitivity fleecu

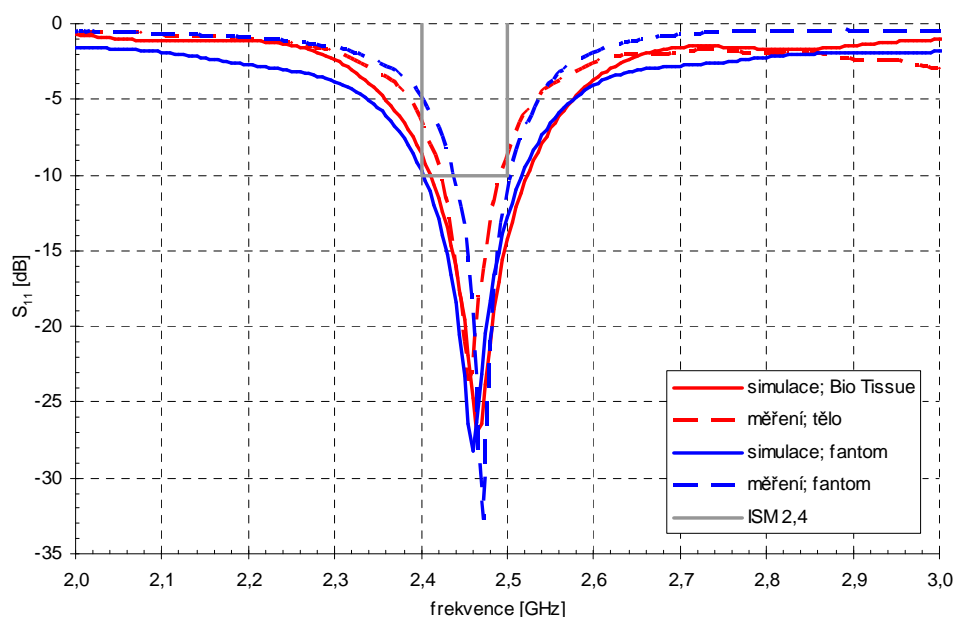


Obrázek 4.3 Činitel odrazu realizovaných vzorků

4.1.2 Vliv lidské tkáně a fantomu

Stejně jako v kapitole zabývající se vlivem lidské tkáně na matematickém modelu antény, jsou změny elektrických vlastností vyšetřovány i na reálné struktuře. Prvním měřením je anténa umístěná přímo na těle v horní třetině zad. V tomto místě se tvar těla pod anténou nejvíce blíží dokonale rovné ploše a měření je ovlivňováno jinými částmi těla minimálně. Druhé měření je uskutečněno na fantomu zhotoveného z agaru o výšce $h_{\text{PHA}} = 20$ mm. Konkrétní vzorek fantomu má neznámé parametry pro pásmo 2,4 GHz, výsledky jsou tedy pouze orientační. Na frekvenci 5,8 GHz má definovanou relativní permitivitu $\epsilon_r = 48$ a měrnou vodivost $\sigma = 8$ S/m. Výsledky měření vlivu lidské tkáně jsou uvedeny na obr. 4.4. Simulace přítomnosti lidského těla na numerickém modelu vykazovala mírné zvětšení šířky pásma, což měření činitele odrazu reálného vzorku nepotvrdilo. Směrové vlastnosti jsou uvedeny v tab. 4.1 a v obr. 4.5 a 4.6. Hodnota změřeného zisku se lišila maximálně o 1,53 dB.

Dále byl sledován průběh činitele odrazu antény překryté lidským tělem. Anténní struktura byla na záda umístěna tak, že osa šíření vlny směřovala proti tělu. Tato situace byla pomocí modelu lidské tkáně z [17] simulována v MWS. Tam však anténa nevykazovala žádnou rezonanční frekvenci (obr. 4.7).



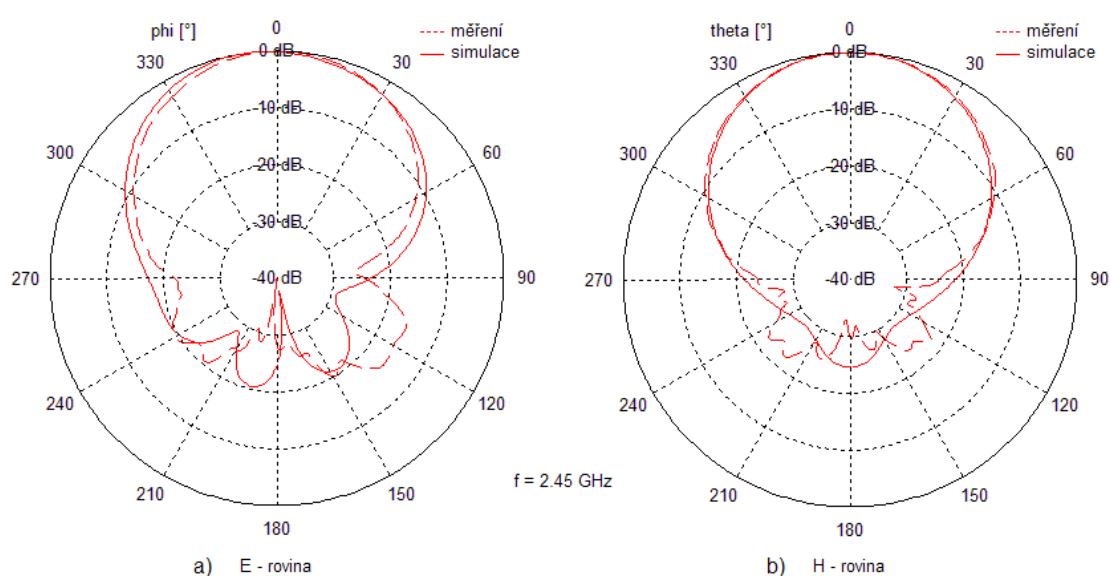
Obrázek 4.4 Činitel odrazu při vyšetření vlivu lidské tkáně, vzorek A

Tabulka 4.1 Parametry směrových charakteristik antény ve volném prostoru a na fantomu

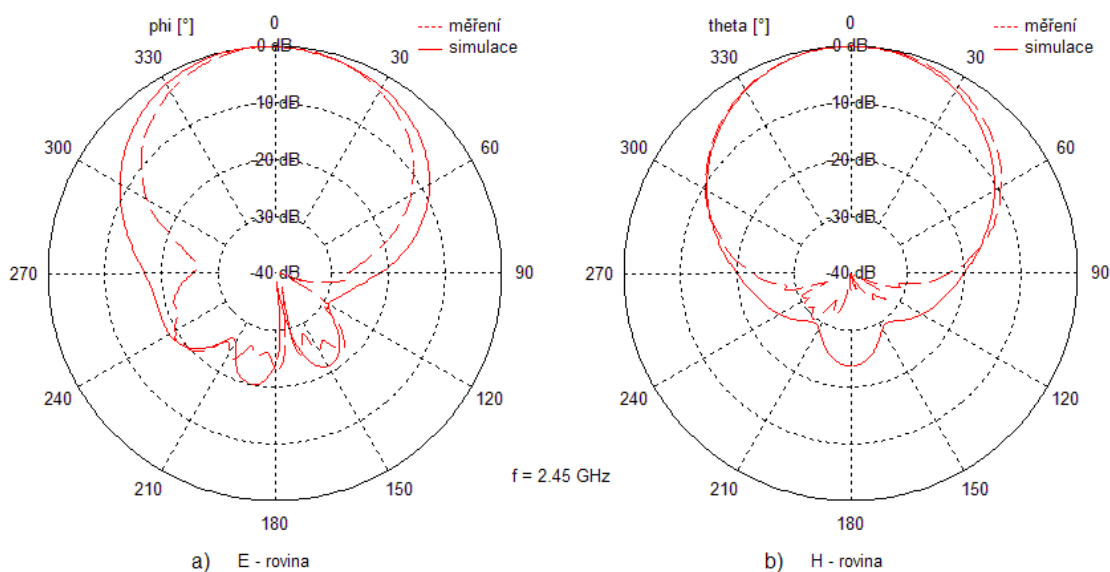
		E – rovina					H – rovina			
		frekvence	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku	zisk	vychýlení svazku	vyzař. úhel (-3dB)	úroveň bočního laloku
		[GHz]	[dB]	[°]	[°]	[dB]	[dB]	[°]	[°]	[dB]
volný prostor	sim	2,45	6,95	7	68,7	-20,4	6,8	0	59,8	-24,6
	měř	2,45	8,35	1	62,2	-16,1	8,33	1	63	-22,1
fantom	sim	2,45	6,95	7	74,2	-18,1	6,95	0	60,9	-24,1
	měř	2,45	8,49	5	60,3	-20	8,49	1	66,4	-28,5

sim. – simulace numerického modelu

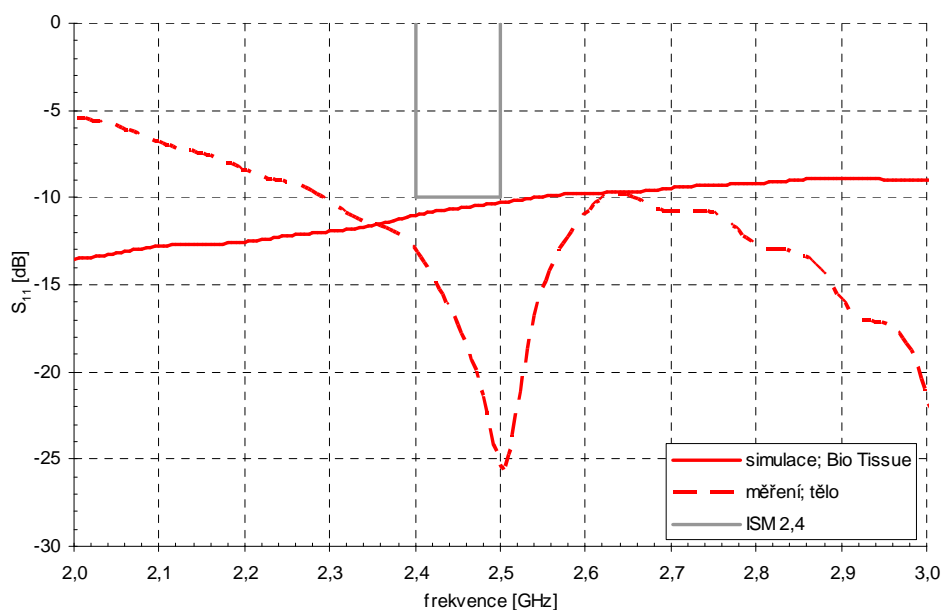
měř. – měření v bezodrazové komoře



Obrázek 4.5 Směrové charakteristiky pro anténu ve volném prostoru, vzorek A



Obrázek 4.6 Směrové charakteristiky pro anténu umístěnou na fantom, vzorek A

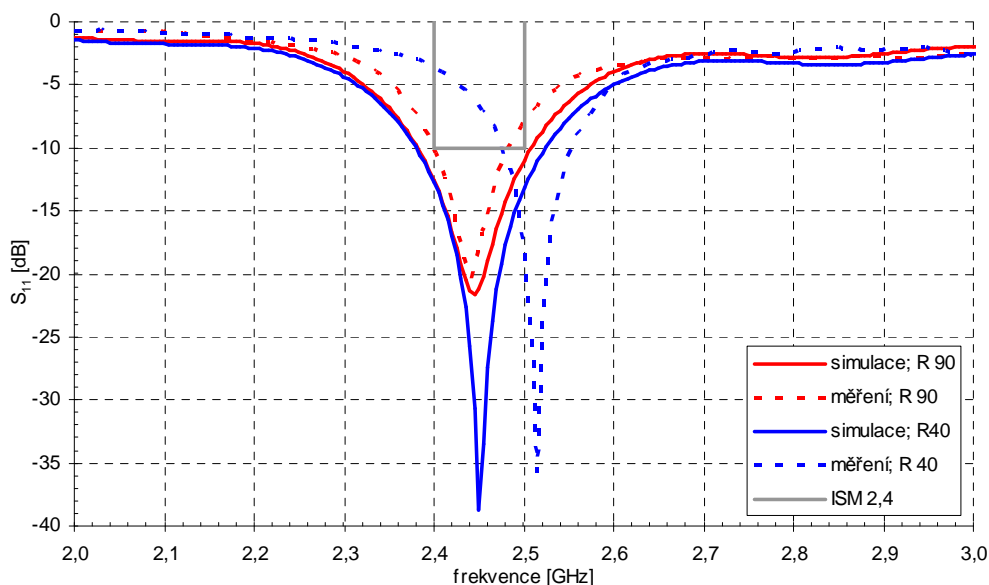


Obrázek 4.7 Činitel odrazu při umístění tkáně na horní stranu antény, vzorek A

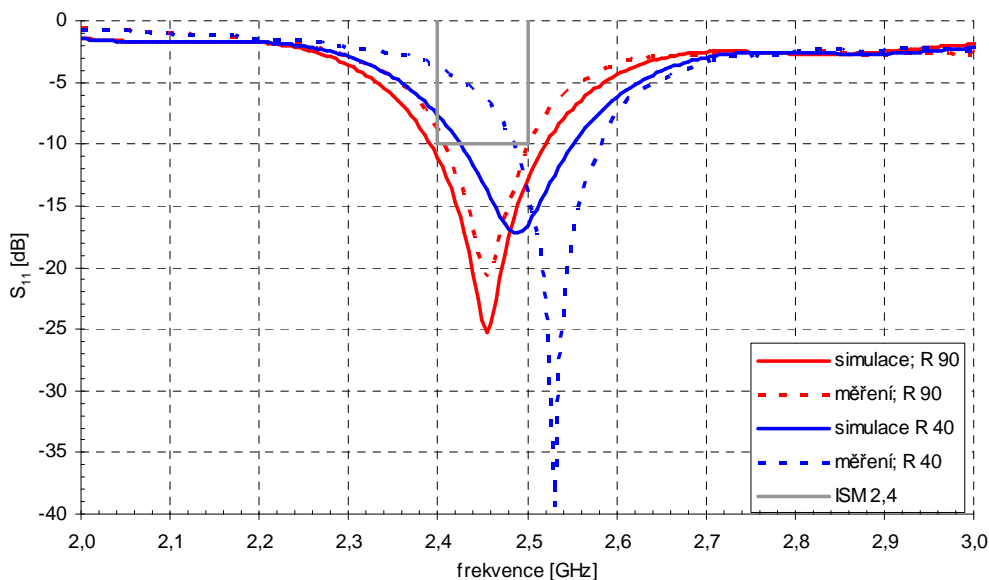
4.1.3 Flexibilita

Pro simulaci ohybu bez vlivu lidského těla je vzorek ohnut do tvaru kopírujícího povrch pomocného papírového korpusu (viz příloha E.1). Korpus poskytuje anténě oporu jen na bočních stranách struktury, díky čemuž nedochází k výraznému ovlivnění vlastností, a lze tak vyšetřit i konvexní ohyb. Pro měření flexibilních vlastností kombinovaných s vlivem lidského těla byla anténa umístěna na části těla se zakřivením

srovnatelným se simulovaným poloměrem. Nevýhodou měděné fólie je tendence nevratné deformace při ostrých ohybech. Z důvodu minimalizace zatížení výsledků chybou bylo pořadí měření prováděno s ohledem na tyto vlastnosti. Oproti výsledkům z numerického modelu vykazoval ohyb o poloměru $R = 40$ mm mnohem výraznější posun rezonanční frekvence a to při vyšetření ohybu v obou osách. Konkrétně až o 58 MHz oproti výsledku ze simulace (obr. 4.8 a obr. 4.9).



Obrázek 4.8 Činitel odrazu pro konkávní ohyb dle osy y, vzorek A



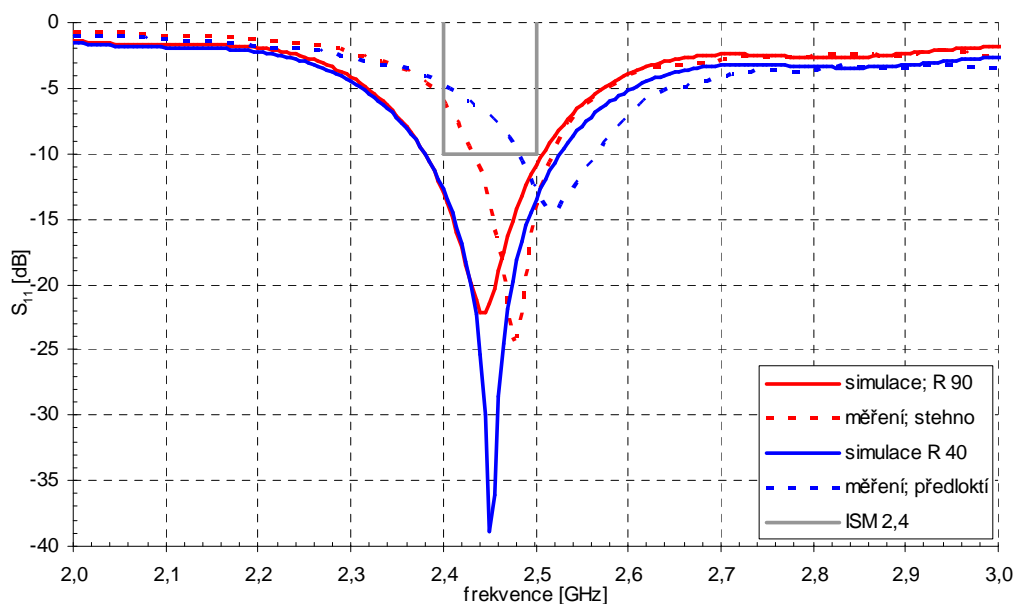
Obrázek 4.9 Činitel odrazu pro konkávní ohyb dle osy x, vzorek A

Níže jsou uvedeny výsledky měření flexibility se zavedením vlivu lidského těla. Měření ohybu o poloměru $R = 40$ mm bylo realizováno na předloktí v místě, kde jeho obvod přibližně odpovídá tomuto poloměru. Měření na poloměru $R = 90$ mm bylo uskutečněno na stehně a měření kulového vrchlíku o poloměru $R = 50$ mm bylo simulováno na rameni.

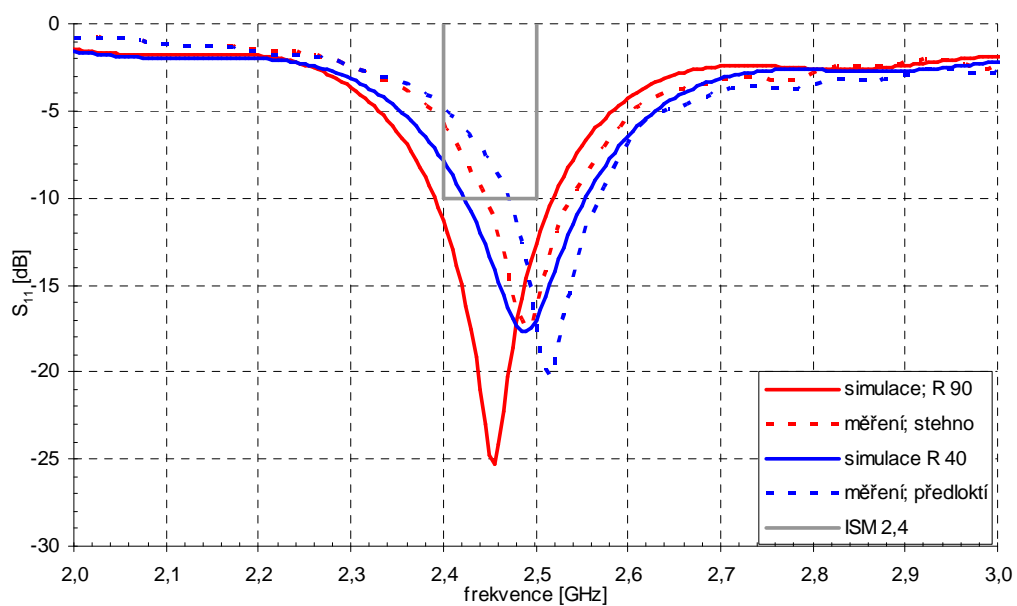
Změřené hodnoty jsou porovnány se simulací antény na modelu tkáně dle [17]. Vliv konkávního ohybu antény umístěné na lidské tkáni je obdobný jako v předchozím případě. Vliv ohybu je významnější než vyplývá z výsledků numerického modelu. Zároveň dochází ke zhoršení impedančního přizpůsobení antény, a to v nejnepríznivějším případě až na -14 dB (obr. 4.10 a 4.11.).

Průběh měřeného činitele odrazu při konvexním ohybu má opačný charakter než vyplývá z výsledků numerického modelu (obr. 4.12 a 4.13). V případě potřeby je vhodné dále prostudovat charakter vlastností při konvexních ohybu. Pravděpodobnost, že taková deformace při reálném použití skutečně nastane, je však minimální.

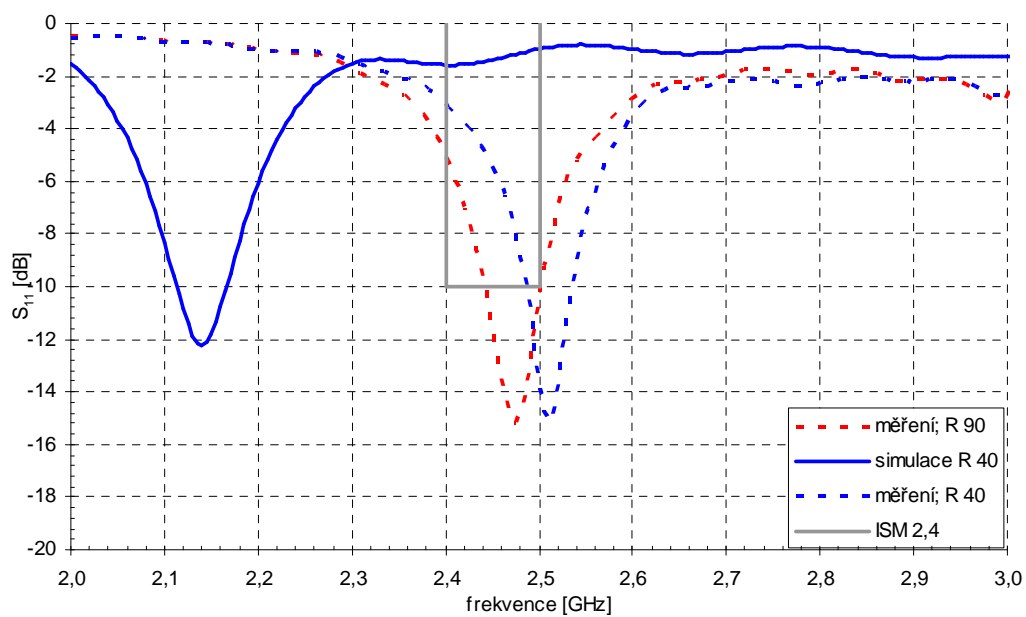
Vyšetření vlastností po uložení na povrch koule je znázorněno na obr. 4.14. Skutečná rezonanční frekvence vůči výsledkům numerického modelu je o 70 MHz nižší, ale ani tak není pokryto celé pásmo ISM 2,4 GHz.



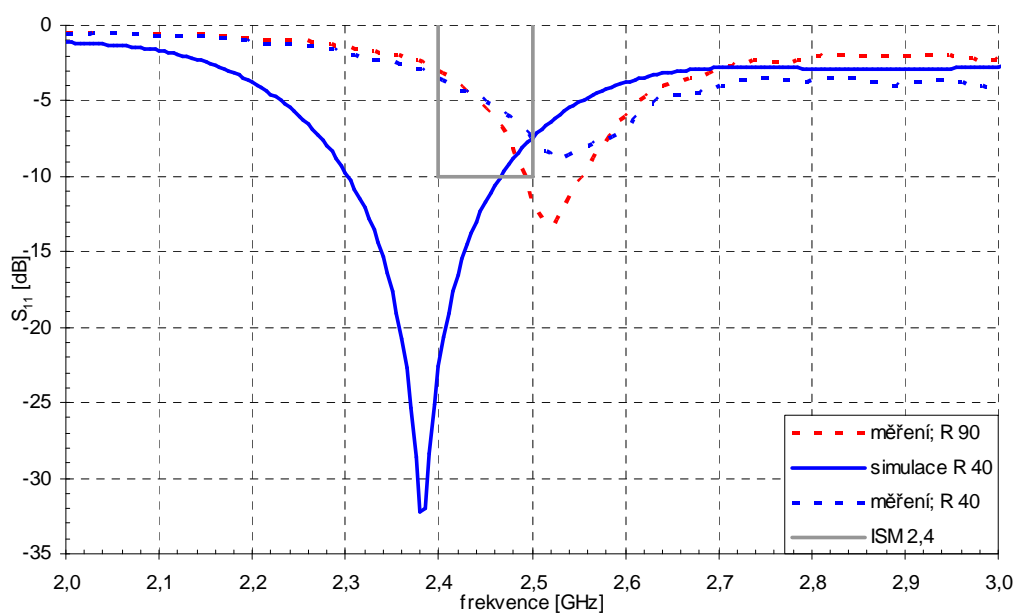
Obrázek 4.10 Činitel odrazu pro konkávní ohyb dle osy y na tkáni, vzorek A



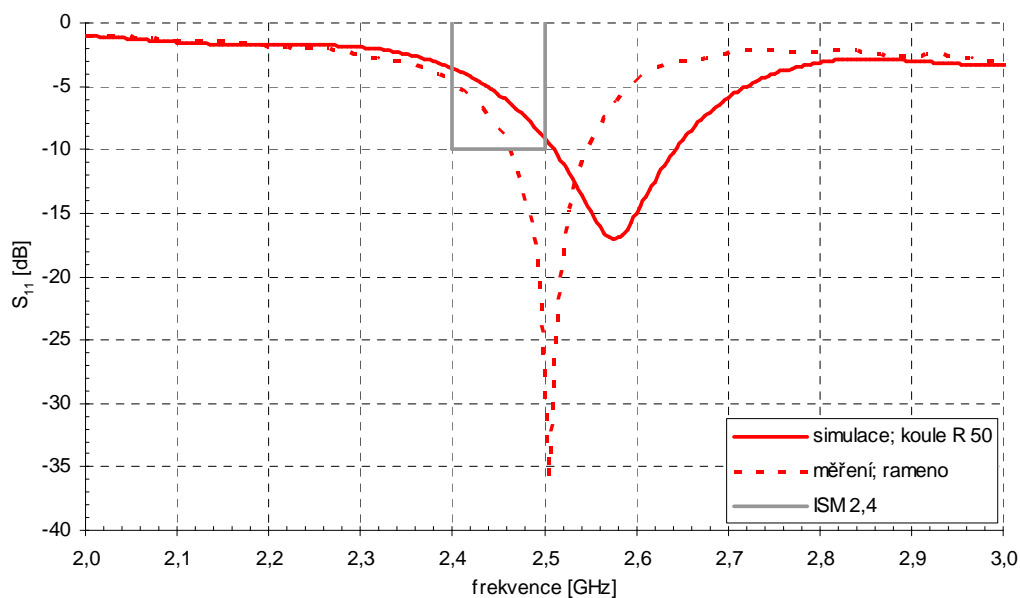
Obrázek 4.11 Činitel odrazu pro konkávní ohyb dle osy x na tkáni, vzorek A



Obrázek 4.12 Činitel odrazu pro konvexní ohyb dle osy y, vzorek A

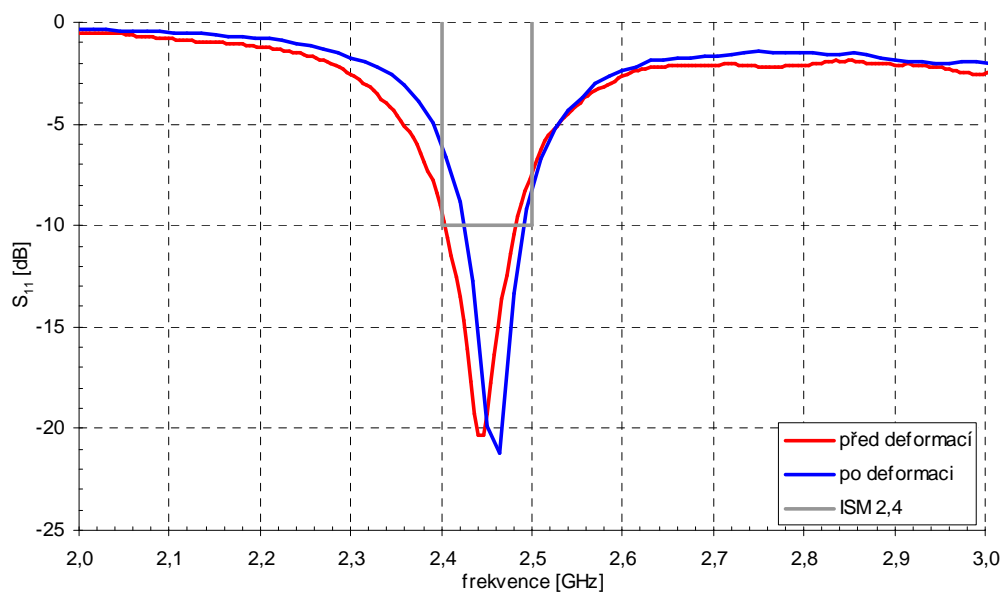


Obrázek 4.13 Činitel odrazu pro konvexní ohyb dle osy x, vzorek A



Obrázek 4.14 Činitel odrazu pro ohyb po povrchu koule na tkáni, vzorek A

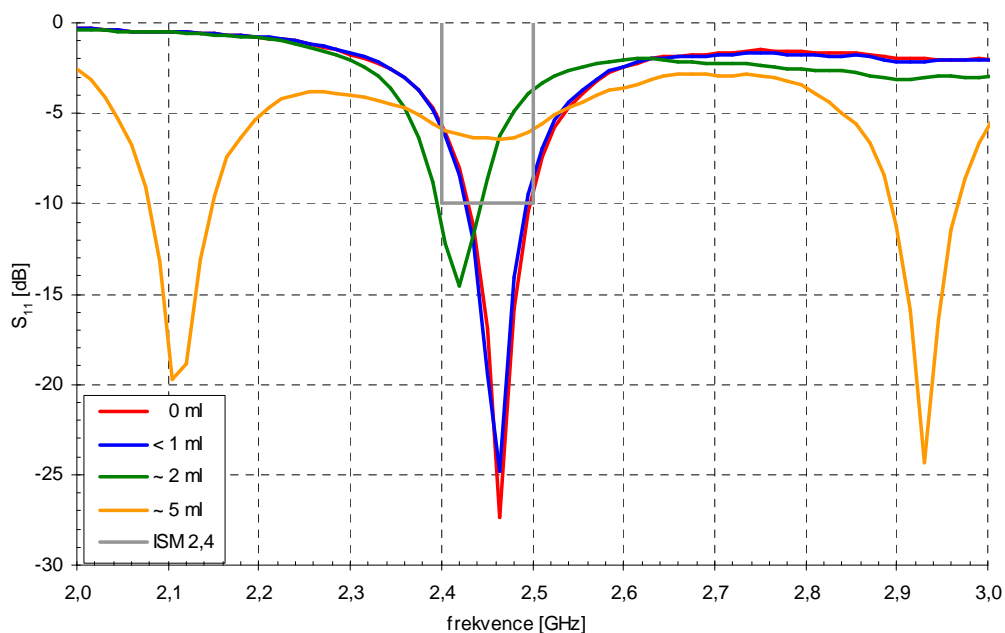
Po měření flexibility vznikly na povrchu fólie motivu nevratné lokální deformace způsobující zavedení chyby měření. Kombinací nulové roztažnosti měděné fólie s geometrickými principy převedení čtvercové plochy na povrch koule došlo k výraznému zdeformování fólie při měření na rameni. Po opětovném narovnání struktury byl porovnán činitel odrazu takto zdeformované antény. Zdeformovaná struktura měla cca o 15 MHz vyšší rezonanční frekvenci, než struktura v původním stavu (obr. 4.15).



Obrázek 4.15 Činitel odrazu vzorku A před a po vyšetření flexibility

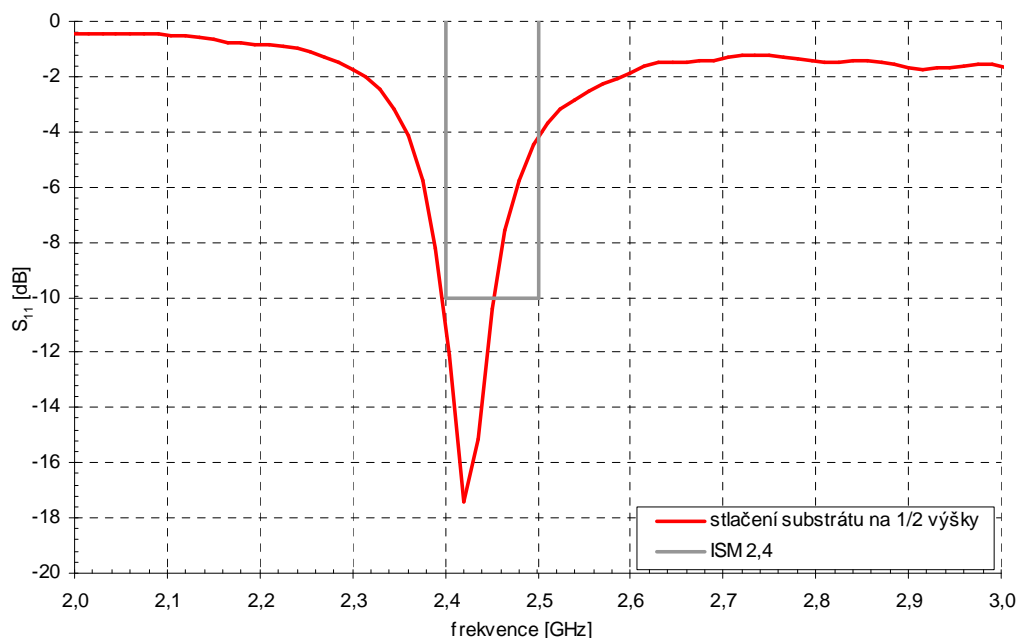
4.1.4 Vnější vlivy

Pro ochranu antény před vlhkostí je anténa pokryta 0,07 mm tenkou vrstvou nepromokavé textilie ze 100% polyesteru. Nepromokavá vrstva zabraňuje nejen ovlivnění impedančního přizpůsobení antény, ale i změně parametrů substrátu. Při vertikálním uložení kapky vody z povrchu antény odtečou. Vliv nepromokavé vrstvy na vlastnosti antény odpovídá průběhu pro 0 ml vody. Pomocí rozprašovače byl experimentálně ověřen vliv kapek vody na strukturu na průběh činitele odrazu. Množství, tvar a rozmístění kapek nelze jednoznačně určit, z tohoto důvodu nebyl tento případ vyšetřen na numerickém modelu. Z obr. 4.16 je patrný vliv uložení nepromokavé struktury a množství na ní ulpěné vody. Pro lepší představu o množství vody na anténě viz příloha E.5.



Obrázek 4.16 Vliv nepromokavé vrstvy a množství vody na jejím povrchu, vzorek A

Důsledek mechanického tlaku na strukturu ze směru osy z je znázorněn na obr. 4.17. Struktura byla pomocí polystyrénového bloku stlačena přibližně na 50% původní výšky. Při stlačení dochází v textilu ke snížení poměru objemu vzduchu v materiálu, a tudíž i ke změně relativní permitivity. Oproti návrhu došlo ke snížení rezonanční frekvence na 2,42 GHz.



Obrázek 4.17 Činitel odrazu při stlačení struktury na 50% výšky, vzorek A

4.2 Sítotisk

Na tvorbu síta pro vytvoření antény bylo použito plátno o hustotě 70 ppi. Fotocitlivá emulze JSI2130 firmy *Jacquard* [22]. Pozitivní vzor motivu byl vytištěn na čirou fólii a ta byla následně přiložena na připravené síto. Doba osvitu byla 50 minut ze vzdálenosti 40 cm. Struktura byla osvícena pod 100W halogenovou žárovkou. Po desetiminutovém oplachování mírným proudem vlažné vody došlo k vymytí nevytvrzené emulze, a tím došlo k vytvoření negativního motivu antény.

Pomocí vytvořeného síta lze vytisknout motiv pomocí konvenčních barev na textil (obr.4.18). Na konkrétním plátně je možné realizovat tisk prvků až do velikosti 0,3 mm.



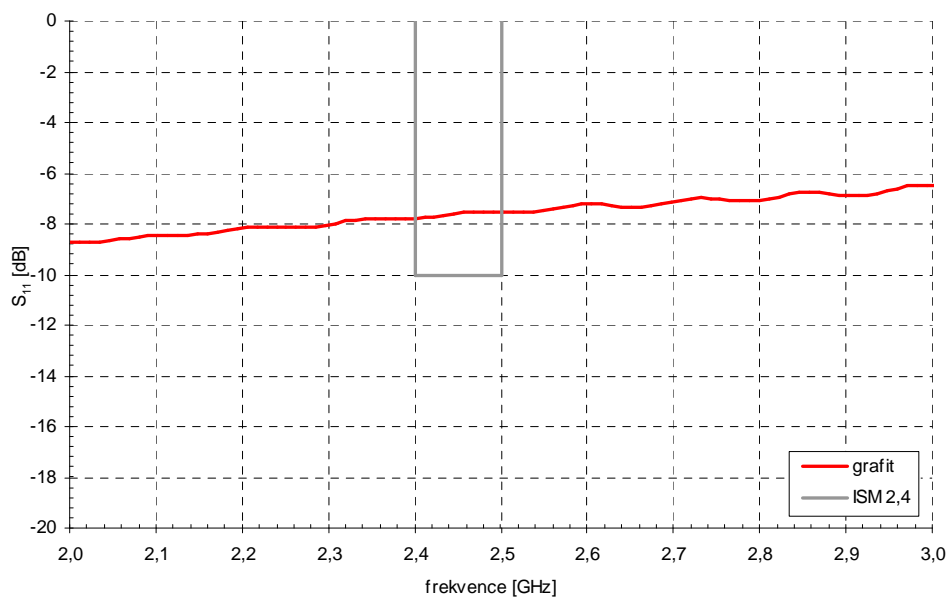
Obrázek 4.18 Motiv vytvořený sítotiskovou metodou – nevodivá barva

4.3 Použití grafitové barvy

K tomuto účelu byla navzdory nevhodnosti nanesení na textil použita barva *Graphit 33* (obr. 4.19). Tato barva má velmi vysokou povrchovou rezistivitu [5]. Pomocí negativní šablony motivu vyřezané na fólii byla na fleece pomocí spreje nanesena tenká vrstva barvy. SMA konektor byl připevněn elektricky vodivým lepidlem. Tato barva je však dle předpokladů vycházejících z udávaných elektrických vlastností, nefunkční (obr. 4.20).



Obrázek 4.19 Motiv realizovaný pomocí grafitového spreje



Obrázek 4.20 Činitel odrazu grafitového vzorku antény

5 ZÁVĚR

Cílem práce bylo seznámit se s problematikou nositelných antén, vyšetřit problematiku přítomnosti lidského těla a vliv flexibility na numerickém a reálném modelu antény. Dalším cílem bylo diskutovat vliv přesnosti metody výroby na anténních parametrech.

Zkoumáním možností použití vodivých vláken byl zjištěn zásadní vliv výběru materiálu na výsledné parametry elektricky vodivé textilie a méně podstatný vliv hustoty uspořádání vláken. Výstupem této kapitoly je tedy důraz na zvýšenou pozornost hodnot měrné vodivosti a povrchové rezistivity vodivých vláken.

V další kapitole bylo představeno několik principů výroby antén umístěných na textil a seznámení se s nimi dopomohlo k lepší představě o šíření elektromagnetické vlny na textilních materiálech. Před samotným výběrem metody výroby je nutno zvážit vhodnost dané technologie pro konkrétní použití. Výběr vhodné metody obecně závisí na velikosti a typu navrhované antény, komplexnosti struktury a požadavku přesnosti výroby.

Ve třetí kapitole byl pro pásmo ISM 2,4 GHz vytvořen numerický model flíčkové antény napájené mikropáskovým vedením, na kterém byl simulován vliv přítomnosti lidské tkáně, při kterém docházelo k mírnému zvýšení rezonanční frekvence o 10 – 20 MHz, snížení zisku antény ve směru šíření a rozšíření hlavního vyzařovacího laloku. Měřením bylo zjištěno zvýšení rezonanční frekvence až o 30 MHz a naopak mírné zvýšení zisku. Vyšetřením flexibility byl zjištěn výraznější posun rezonanční frekvence a to v závislosti na poloměru, orientaci a způsobu ohybu. Z výsledků simulace měření lze obecně konstatovat, že výraznější deformace antény vede k rozladění antény mimo pracovní pásmo a k deformaci vyzařovacích charakteristik. Nejnepříznivější podmínky vykazoval ohyb modelu ve více směrech současně.

Výsledky vlivu přítomnosti lidského těla a ohybu struktury byly porovnány s výsledky vybraných zdrojů. Ačkoliv podmínky simulací v publikacích nebyly totožné s touto prací, obecně se jednalo o totožný nebo velmi podobný charakter změn parametrů.

Realizovaný vzorek flíčkové antény byl vytvořen pomocí měděné fólie na textilním substrátu. Průběh činitele odrazu, směrové charakteristiky a zisk se výrazně neliší od výsledků získaných z numerického modelu. Při výrazných opakovaných ohybech dochází k nevratným změnám elektrických vlastností antény.

Metodou sítotisku byla vytvořena a testována šablona motivu antény. Navzdory technicky náročnější přípravě vzoru motivu, dosahuje tato metoda poměrně vysoké přesnosti výroby. Pro účely použití elektricky vodivé vrstvy byl grafitový sprej vyhodnocen jako nevhodný.

LITERATURA

- [1] KUHN, H., CHILD A. a REYNOLDS J.R. Electrically conductive textiles. *Handbook of conducting polymers*. 1998, s. 993-1013. DOI: 0-8247-0050-3.
- [2] JOYNER, K.H., P.R. COPELAND a I.P. MACFARLANE. An evaluation of a radiofrequency protective suit and electrically conductive fabrics. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 1989, vol. 31, issue 2, s. 129-137. DOI: 10.1109/15.18780. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=18780>.
- [3] YUEHUI OUYANG a W.J. CHAPPELL. High Frequency Properties of Electro-Textiles for Wearable Antenna Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2008, vol. 56, issue 2, s. 381-389. DOI: 10.1109/TAP.2007.915435. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4447363>.
- [4] YUEHUI OUYANG a W. CHAPPELL. Measurement of electrotexiles for high frequency applications. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005*. IEEE, 2005, vol. 56, issue 2, s. 1679-1682. DOI: 10.1109/MWSYM.2005.1517035. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1517035>.
- [5] TME: Graphit 33. [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/37ea6c6a8dc5be4bfaea1154b8eff91b/TKC3%20GRAPHIT33.TDS.PDF>
- [6] Henkel: Electrodag PF-410. [online]. [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: [https://tds.us.henkel.com//NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/9DBE873FA321AC17852576C50081F47C/\\$File/ELECTRODAG%20PF-410-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com//NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/9DBE873FA321AC17852576C50081F47C/$File/ELECTRODAG%20PF-410-EN.pdf)
- [7] ELCHEMCo: Měděná stínící páska s elektrovodivým lepidlem. [online]. [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://web.elchemco.cz/medena-paska.php>
- [8] LI, Yi, Russel TORAH, Steve BEEBY, John TUDOR, S. KIM, B. S. COOK, J. R. COOPER, M. M. TENTZERIS. An all-inkjet printed flexible capacitor on a textile using a new poly(4-vinylphenol) dielectric ink for wearable applications. *2012 IEEE Sensors*. 2012, s. 71-90. DOI: 10.2495/978-1-84564-986-9/004.
- [9] BALANIS, C. A., *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd Edition, 722-736 and 869-870, John Wiley & Sons, Asia Pte Ltd., Singapore, 1997.
- [10] LESNIKOWSKI, J. Dielectric permittivity measurement methods of textile substrate of textile transmission lines. *Przegląd elektrotechniczny*. 2012, : 148 - 151. ISSN ISSN 0033-2097, R. 88 NR 3a/2012. Dostupné z: <http://www.red.pe.org.pl/articles/2012/3a/43.pdf>
- [11] POLÁK, R. *Měření komplexní permitivity materiálů v pásmu milimetrových vln*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=51230
- [12] ORLOFF, Nathan D., Jan OBRZUT, Christian J. LONG, Thomas LAM, Pavel KABOS, David R. NOVOTNY, James C. BOOTH a J. Alexander LIDDLE. Dielectric Characterization by Microwave Cavity Perturbation Corrected for Nonuniform Fields. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2014, 62(9): 2149-2159. DOI: 10.1109/TMTT.2014.2336775. ISSN 0018-9480. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6862934>
- [13] HAUSMAN S., JNUSZKIEWICZ L., MICHALAK M., KACPRZAK T., KRUCINSKA I.,

- High Frequency Dielectric Permittivity of Nonwovens, *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, Vol. 14, 2006, No. 5 (59), 60 – 63. Dostupné z: http://www.fibtex.lodz.pl/59_17_60.pdf
- [14] IVSIC, B., D. BONEFACIC a J. BARTOLIC. Considerations on Embroidered Textile Antennas for Wearable Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2013, vol. 12, s. 1708-1711. DOI: 10.1109/LAWP.2013.2297698. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6701382>.
- [15] ANTAR, Yahia, Debatosh GUHA. Microstrip and printed antennas: new trends, techniques, and applications. DOI: 9780470681923.
- [16] ZHANG, Shiyu, Alford CHAURAYA, Rob SEAGER, Yiannis C. VARDAXOGLU, William WHITTOW, Tessa ACTI, Tilak DIAS, Vladan. KONCAR, Emmanuel. DEFLIN a André. WEILL. Fully fabric knitted antennas for wearable electronics. *2013 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*. 2013, s. 155-176. DOI: 10.1533/9781845690441.155.
- [17] Foundation for Research on Information Technologies in Society: Interactive tissue frequency chart. [online]. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.itis.ethz.ch/virtual-population/tissue-properties/database/tissue-frequency-chart/>.
- [18] WANG, Zheyu, Lanlin ZHANG, Dimitris PSYCHOUDAKIS a John L. VOLAKIS. Flexible textile antennas for body-worn communication. *2012 IEEE International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*. 2012. DOI: 10.1109/iwat.2012.6178647.
- [19] HERTLEER, Carla, Hendrik ROGIER, Luigi VALLOZZI a Lieva VAN LANGENHOVE. A Textile Antenna for Off-Body Communication Integrated Into Protective Clothing for Firefighters. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2009, vol. 57, issue 4, s. 919-925. DOI: 10.1109/TAP.2009.2014574. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4812194>
- [20] Rosenberger: 32K441-500L5. [online]. [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: <http://rosenberger.de/ok/images/documents/db/32K441-500L5.pdf>
- [21] Pasternack: The Largest Slection of RF & Microwave Products Available for Same Day Shipping. [online]. [cit. 2015-04-01]. Dostupné z: <https://www.pasternack.com/images/pdf/7%20Connector%20Identifier.pdf>
- [22] Jacquard Products: Ptoho Emulsion. [online]. [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: <http://www.jacquardproducts.com/photo-emulsion.html>

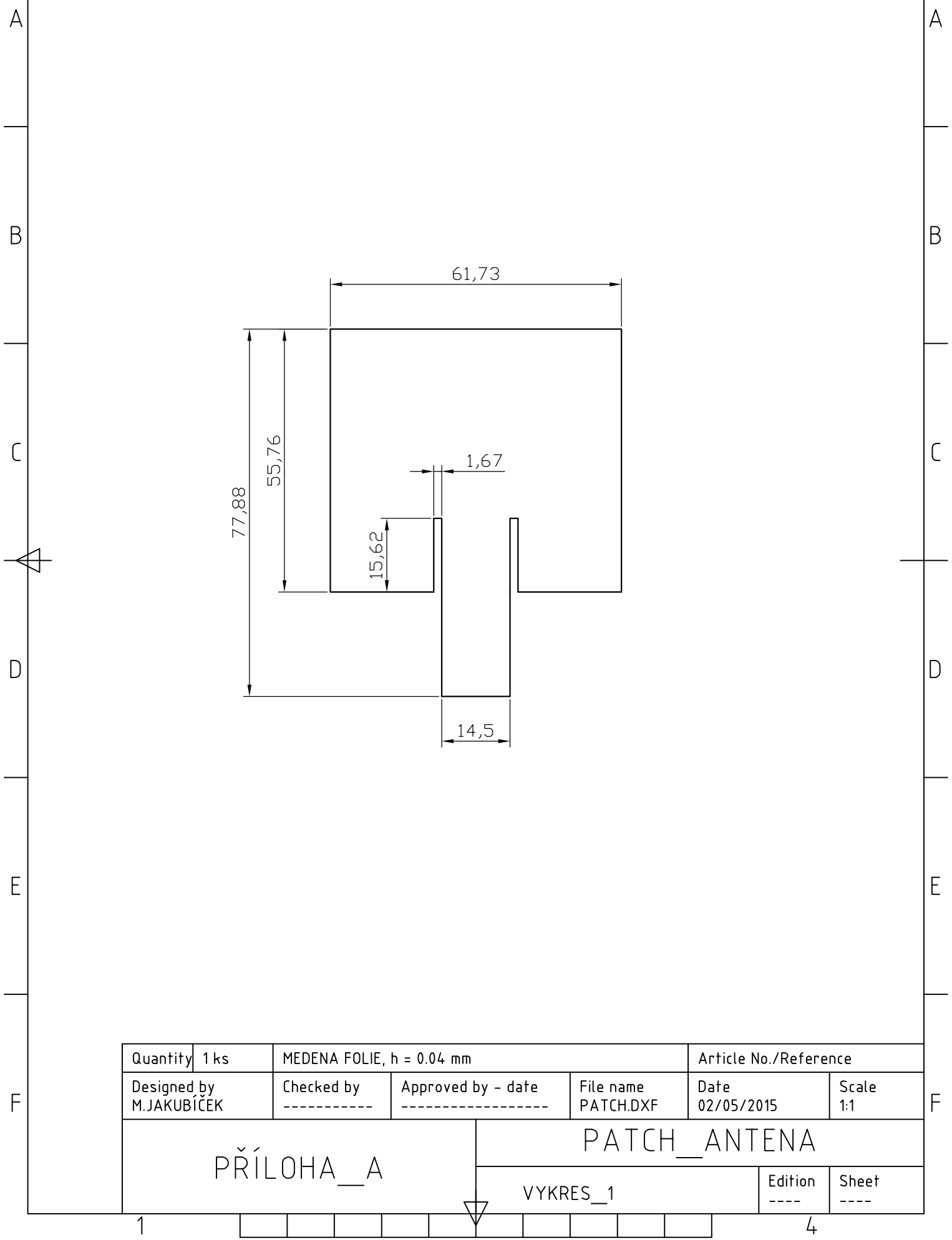
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

B	šířka pásma
c_0	rychlost světla ve vakuu
C	kapacita kondenzátoru
E	velikost intenzity elektrického pole
d	vzdálenost mezi deskami
d_{IN}	průměr vnitřního vodiče koaxiálního vedení
d_{OUT}	průměr vnějšího vodiče koaxiálního vedení
ε_0	permitivita vakua
ε_r	relativní permitivita
$\varepsilon_{\text{reff}}$	efektivní relativní permitivita
f_{REZ}	rezonanční frekvence
H	velikost intenzity magnetického pole
h_{PATCH}	výška flíčku
h_{PHA}	výška fantomu
h_{GND}	výška zemní desky
h_{SUB}	výška substrátu
h_{TEXTILE}	výška textilu
h_{GAP}	výška mezery
h_{SKIN}	výška kůže
h_{FAT}	výška tuku
h_{MUSCLE}	výška svaloviny
k_0	vlnové číslo
l_{PATCH}	délka flíčku
l_{SUB}	délka substrátu
l_{TEXTILE}	délka textilu
l_{SPACE}	délka zanoření
λ_0	délka vlny ve vakuu
Q	činitel jakosti rezonátoru
R	poloměr ohybu (rádius)
R_s	povrchová rezistivita

R_{EDGE}	hranová vstupní impedance
R_{50}	impedance 50 Ω
S	plocha desek kondenzátoru
S_{11}	činitel odrazu na vstupu
S_{21}	činitel přenosu
$\tan \delta$	ztrátový úhel
σ	měrná vodivost
w_{PATCH}	šířka flíčku
w_{SUB}	šířka substrátu
w_{TEXTILE}	šířka textilu
w_{STR}	šířka mikropáskového vedení
w_{SPACE}	šířka zanoření
x	osa kartézské soustavy souřadnic
y	osa kartézské soustavy souřadnic
z	osa kartézské soustavy souřadnic
xy	rovina kartézské soustavy souřadnic
yz	rovina kartézské soustavy souřadnic
xz	rovina kartézské soustavy souřadnic
AMF	asymmetric meandered flare, asymetrická meandrovitá anténa
BW	bandwidth, šířka pásma
CO	cotton, bavlna
CST	Computer Simulation Technology
dB	decibel
dBi	decibel vůči izotropní anténě
DUT	device under test, testované zařízení
E-textil	elektrotextil
ISM	Industrial, scientific and medical, průmysl, věda a zdravotnictví
ITIS	Information Technologies in Society
MMCX	micro-miniature coaxial
MUT	material under test, testovaný materiál
MWS	Microwave Studio
PEC	perfect electric conductor, ideální elektrický vodič
PES	polyester

PET	polyethyltereftalát
ppi	picks per inch, hustota vláken na jeden palec
SMA	subminiature version A
UV	ultraviolet, ultrafialové
VNA	vector network analyzer, vektorový síťový analyzátor

1	2	3	4
RevNo	Revision note	Date	Signature
			Checked



B SEZNAM MATERIÁLŮ A PŘÍSTROJŮ

B.1 Seznam použitých materiálů

Materiál	Popis / označení	Výrobce
textil	fleece, polyester 100%, 272 g/m ² , 3 mm, modrá	KÖSSO
textil	bavlna/polyester 65/35%, 288 g/m ² 0,4 mm, zelená	KÖSSO
textil	šustřákovina nepromovaká, polyester 100%, 0,07mm, 65 g/m ²	SILITEX
fólie	měděná fólie, 0,04 mm,	ELCHEMCO
emulze	fotocitlivá emulze JSI2130	JACQUARD
barva	barva na sítotisk, bílá	-
barva	Graphit 33, sprej	KONTAKT CHEMIE
lepidlo	Wire glue	ANDERS PRODUCTS
roztok	chlorid železitý, FeCl ₃	-
fantom	agar, $\epsilon_r = 48$, $\sigma = 8$ S/m @5,8 GHz	-

B.2 Seznam použitých přístrojů a pomůcek

Zařízení	Popis / označení	Výrobce
korpus	R 90	-
korpus	R 40	-
konektor	SMA, panel connector, 32K441-500L5	ROSENBERGER
VNA	vektorový síťový analyzátor ZVL, 9kHz - 13,6 GHz	ROHDE & SCHWARZ
laboratoř	bezodrazová komora	-
software	CST Microwave Studio, student licence	CST
software	MatLab, student licence	MATHWORKS

C VÝPOČET ROZMĚRŮ MOTIVU FLÍČKU V PROGRAMU MATLAB

```
%f_rez - resonant frequency [Hz]
%e_r   - relative permittivity [-]
%h_sub - substrate height [m]
%Z_in  - input impedance [ohm]
function s = patch_dim(f_rez, e_r, h_sub, Z_in)

if nargin < 4
    warning('Not enough input arguments.');
```

$$W = \frac{c_0}{2f_{\text{rez}} \sqrt{\frac{e_r + 1}{2} + \frac{e_r - 1}{2} \left(1 + 12 \left(\frac{h_{\text{sub}}}{W}\right)^{-1/2}\right)}}$$

```
    help patch_dim;
    return;
end

c_0 = 3e8;

W = c_0/(2*f_rez)*sqrt(2/(e_r+1));

W_mm = W*1000                                %patch width in milimeters

er_eff = ((e_r+1)/2)+((e_r-1)/2)*(1+12*(h_sub/W))^(1/2);

delta_L = h_sub*0.412*(((er_eff+0.3)*((W/h_sub)+0.264))/...
((er_eff-0.258)*((W/h_sub)+0.8)));

delta_L_mm = delta_L*1000;

L = (c_0/(2*f_rez*sqrt(er_eff)))-2*delta_L;

L_mm = L*1000                                %patch length in milimeters

lambda_0 = c_0/f_rez;

k_0 = (2*pi)/lambda_0;
















G_1 = (W/(120*lambda_0))*(1-((1/24)*(k_0*h_sub)^2));

R_edge_ohm = 1/(2*G_1);


l_space = (L/pi)*acos(sqrt(Z_in/R_edge_ohm));


l_space_mm = l_space*1000                    %space length in milimeters
```

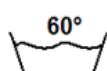
D VLASTNOSTI POUŽITÝCH TEXTILNÍCH MATERIÁLŮ


CO/PES					
fleece					
nepromokavá šustřákovina					


legenda:


 ruční praní - maximální teplota 40° C


 maximální teplota praní 40° C


 maximální teplota praní 60° C

 výrobek se nesmí bělit

 žehlení při maximální teplotě 110° C

 žehlení při maximální teplotě 150° C

 profesionální chemické čištění tetrachloroethenem

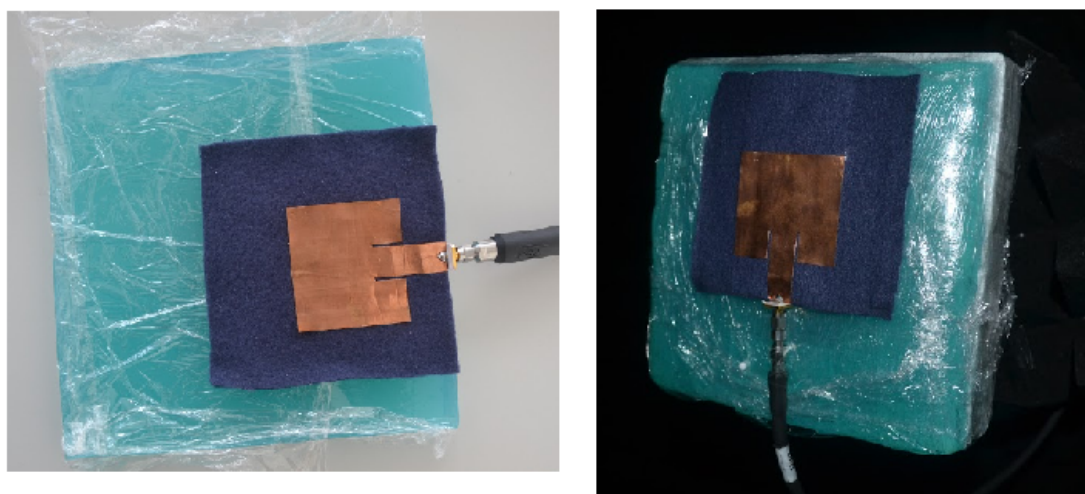
 není vhodné k sušení v bubnové sušičce

E FOTOGRAFIE

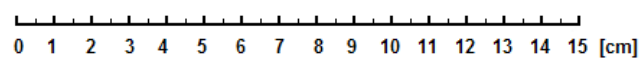
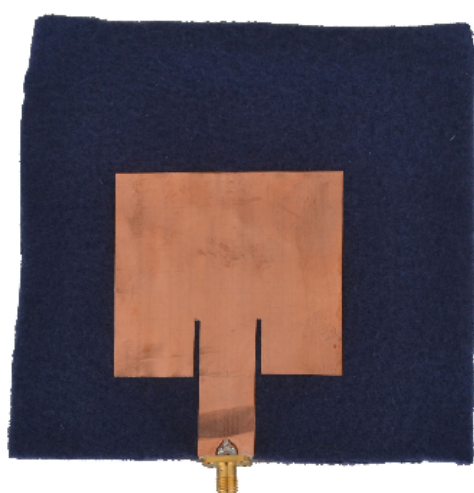
E.1 Korpus pro měření ohybu antény



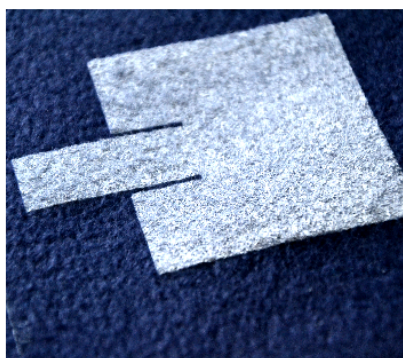
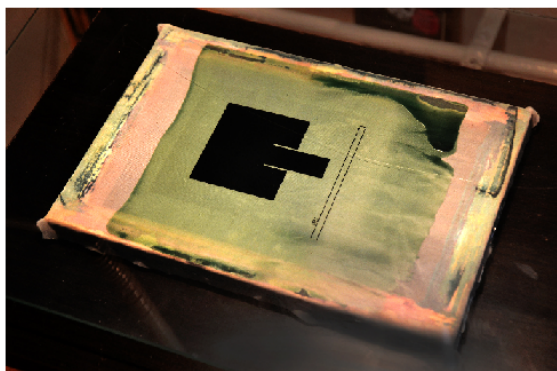
E.2 Měření na fantomu a v bezodrazové komoře



E.3 Plátování



E.4 Sítotisk



E.5 Měření vlivu přítomnosti vody

2 ml vody na povrchu antény

